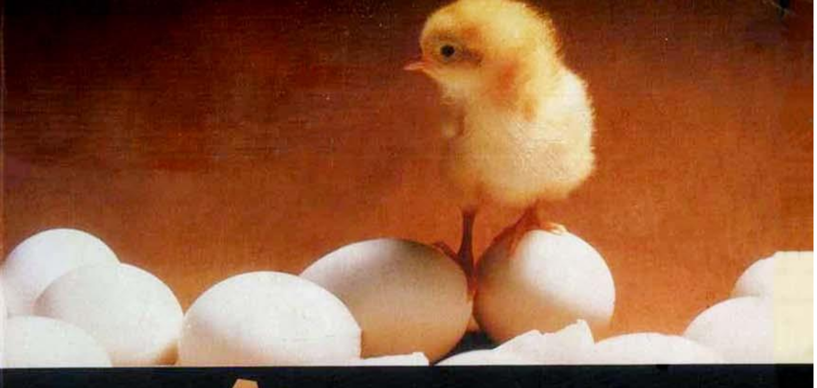


La vida, un estadio intermedio

Carsten Bresch

Biblioteca
Científica
Salvat

La vida, un estadio intermedio

Carsten Bresch

SALVAT

Versión española de la obra original alemana
Zwischenstufe Leben: Evolution ohne Ziel?,
publicada por R. Piper & Co. Verlag de Munich

Traducción: José Vicuña
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass
Foto de cubierta: © A.G.E. FotoStock

Escaneado: thedoctorwho1967.blogspot.com
Edición digital: Sargont (2018)

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8977-X (Volumen 97)
Depósito Legal: B-9197-1995
Publicada por Salvat Editores. S.A., Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a. Mayo 1995
Printed in Spain

ÍNDICE

PRÓLOGO
«...y descubrieron la forma de su mundo...»

EVOLUCIÓN DE LA MATERIA
1. El escenario: espacio-tiempo, astros, galaxias
2. Del hidrógeno y de los soles
3. Su fulgor es evolución
4. Catálisis: la varita mágica de la química
5. Elementos básicos y estructuras
6. La escritura de las moléculas

EVOLUCIÓN DE LA VIDA
7. El ciclo funcional de la célula
8. La torre de lo improbable
9. La irrupción de la vida
10. Cómo aprendió la vida a vivir
11. Dos soluciones a la crisis energética
12. El primer amor
13. No hay interior sin exterior
14. De la célula aislada a los organismos multicelulares
15. El cuerno de la abundancia de las especies
16. El sistema nervioso: mecanismo automático de estímulo-respuesta

EVOLUCIÓN INTELECTUAL
17. La evasión de la cárcel del presente
18. Los elegidos
19. El lenguaje: una estructura compuesta por conceptos
20. El hilo rojo evolutivo en manos del hombre
21. La libertad a través de la dependencia
22. Perspectivas

SINOPSIS
23. ¿Finalidad o sinsentido?
24. El fantasma del caos: un malentendido de la física
25. El juego de dados que no era un juego de azar

EPÍLOGO
Más allá de la ciencia

PRÓLOGO

«...Y DESCUBRIERON LA FORMA DE SU MUNDO»

Todo fluye.

HERÁCLITO

El hombre ya no vive sobre un disco redondo. Ya no habita en el centro del Universo, en tomo al que giran todos los astros del cielo. La ciencia ha convertido la Tierra en una esfera. Ha desplazado a esa esfera del centro del Cosmos y la ha descrito como uno de los nueve planetas que giran alrededor de nuestro sol. Este, a su vez, ha quedado convertido en una estrella bastante corriente. Forma parte, junto a ciento cincuenta mil millones de estrellas, de una gran aglomeración con forma de espiral, de una galaxia: de nuestra Vía Láctea. Pero tampoco la Vía Láctea es nada extraordinario. Los científicos han descubierto millones de galaxias —más o menos grandes— en las profundidades del Universo.

Hasta el presente la ciencia ha descubierto más de un millón de especies diferentes de seres vivos que habitan en nuestro planeta. Ha constatado que todos los organismos están compuestos por células; algunos por una sola célula, y otros —como el hombre— por billones de células. La ciencia ha analizado esas células en el hombre, en los animales y en las plantas, y ha comprobado que su estructura y su composición química es siempre parecida. Todas las células contienen determinadas moléculas gigantes que sólo se producen en los organismos vivos: los ácidos nucleicos y las proteínas. Sin embargo, todas las moléculas se componen de los mismos átomos de que están formados la Tierra y todos los demás cuerpos celestes.

Desde tiempos inmemoriales, la imagen nocturna del firmamento constituía una prueba de la invariabilidad del Cosmos. En cuanto a los seres vivos, el continuo ciclo de nacimientos y muerte de los organismos, y el florecimiento y declive de las culturas parecían meramente movimientos circulares de un mundo básicamente inmutable. Parecía como si los planetas, las estrellas, los montes y los océanos, las plantas, los animales y los seres humanos, no fueran más que componentes constantes de un orden permanente que aparecía inalterado desde el día de la Creación.

Pero la ciencia nos dice que esa impresión es falsa, que también las estrellas nacen un día para después apagarse: que los continentes se desintegran para volver a reagruparse: que sus movimientos hacen surgir las montañas: que las formas primitivas de vida han dado lugar a nuevas especies de seres vivos superiores, y que muchas de las antiguas especies se han extinguido. La naturaleza del Cosmos no es, por tanto —así lo afirma la ciencia— un permanente proceso cíclico imperturbable, sino un proceso constante y dinámico de *desarrollo*. Pero tan lento, que ni siquiera toda la vida de una persona sería suficiente para apreciar directamente los cambios que se producen en la naturaleza.

El proceso de desarrollo generalizado en todos los ámbitos de nuestro planeta, que incluye el surgimiento de los seres humanos a partir de otras especies antropoides, es lo que se denomina *evolución*. El descubrimiento de ese proceso universal ha sido el logro más importante y sensacional de la ciencia hasta el presente. Queremos, por tanto, seguir el rastro de la historia de esa idea.

Ya en los tiempos «precientíficos» el hombre se planteó la cuestión del origen de las cosas: ¿Cómo surgieron la Tierra y el cielo con sus estrellas? ¿Cuál es el origen de las plantas y los animales? Pero sobre todo: ¿De dónde provenía él mismo, el hombre? Los mitos y las religiones dieron sus respuestas a estas preguntas. Presentaron imágenes variadas y pintorescas sobre la influencia y el poder de seres sobrenaturales. A menudo podemos reconocer en ellas, por el modo en que descri-

ben la creación del mundo como un proceso escalonado en etapas, cierta intuición de la existencia de un proceso evolutivo: se separan la luz y las tinieblas y surge el cielo y la Tierra: en un principio surgen las plantas, más tarde los animales pueblan las aguas y después la tierra. Sólo al final aparece el hombre.

La filosofía de la antigua Grecia se distancia ya de esas imágenes pintorescas que materializan los símbolos en un mundo mítico y religioso. El pensamiento científico nace en las proximidades de las más antiguas civilizaciones de la humanidad: en la vecindad de Babilonia, Assur y Tebas. Surge en la pequeña Mileto de Asia Menor. Allí, en el siglo VI a.C., Tales enseña que todas las cosas están hechas de una misma materia primitiva, y cree que esa materia es el agua. Su discípulo Anaximandro llega a explicar los orígenes de la humanidad: nuestros antecesores se habían desarrollado a partir de los peces; habían salido del mar y se habían instalado en la tierra. Jenófanes encontró fósiles y dio una interpretación correcta de su origen. En la vecina Éfeso. Heráclito consideraba que todo está en movimiento constante y en progresivo desarrollo. Considera que la lucha entre opuestos es la fuerza motriz de toda existencia: la lucha como origen de todas las cosas.

Doscientos años más tarde, Aristóteles, discípulo de Platón y tutor de Alejandro Magno, recopila todos los conocimientos de los filósofos griegos. Al igual que Demóstenes había hecho antes que él. Aristóteles postula que toda vida ha surgido del fango formado por la materia inerte. Pero para él la vida es también el resultado de la interacción entre un principio pasivo —que no sería otra cosa que lo que denominamos materia— y un principio activo capaz de hacer realidad lo que es meramente posible, lo que podríamos denominar «estructura».

Los filósofos griegos sentaron una nueva base para el pensamiento humano. Y fueron ellos los primeros en plantear cuestiones científicas en relación con la evolución.

También el filósofo y poeta Lucrecio escribió sobre «la naturaleza de las cosas». Aportó nuevas ideas al pensamiento

griego y postuló que las especies animales existentes sólo han podido sobrevivir gracias a su astucia, fuerza o rapidez, y que otros peor dotados habían sucumbido tiempo atrás. En unos pocos versos. Lucrecio nos presenta una imagen de la selección natural; es decir, del triunfo de las especies superiores en la lucha por la existencia. Posteriormente se vuelve a olvidar la idea de evolución.

Durante todo un milenio la religión domina el pensamiento de Occidente. Todo acontecimiento es considerado como una manifestación del orden divino. Se considera que el único sentido de la existencia terrenal es prepararse para la plenitud de una vida en el más allá. El origen del mundo, el surgir de la vida, la creación del hombre, son explicados por la Iglesia según su interpretación de la Biblia. El mensaje espiritual está enraizado en las Sagradas Escrituras y se apoya en la autoridad de los Santos Padres.

Tras la agitación de la invasión de los bárbaros, el imperio árabe se convierte en el centro de la cultura. En él se aglutinan todos los conocimientos de la época. De Extremo Oriente llega la técnica china de la elaboración del papel; de la India, el sistema decimal (aunque todavía hoy seguimos hablando de «números arábigos»). En las bibliotecas del imperio islámico se estudian las obras de los filósofos griegos, entre los cuales el más reputado es Aristóteles. Desde Persia hasta España florece la ciencia árabe.

En Europa las instituciones eclesiásticas son las únicas transmisoras de los restos de las culturas griega y romana. Pero los postulados filosóficos quedan velados por la sombra de la teología. Posteriormente las Cruzadas harían más intenso el contacto con las culturas árabes. En el siglo XII surgen las primeras universidades en Europa. El fraile dominico Tomás de Aquino (1225-1274) funde la filosofía aristotélica con la teología cristiana, y elabora sus pruebas filosóficas de la existencia de Dios. Sus teorías siguen (incluso hoy día) sirviendo de fundamento a los dogmas de la Iglesia católica. Sin embargo, algún tiempo después, los franciscanos Duns Scoto (1270-1308) y William Ockham (hacia 1290-1349), este último posteriormente excomulgado, postulan una clara

división entre el pensamiento filosófico-analítico y el pensamiento teológico. Su iniciativa contribuye a poner los cimientos de lo que pocos siglos después llegará a erigirse como una ciencia independiente de la teología.

La cultura siempre se ha centrado en las ciudades. El fin de la Edad Media estuvo marcado por la progresiva influencia que fueron adquiriendo las ciudades. Comienzan a florecer la artesanía y el comercio. Se establecen nuevos vínculos económicos y culturales. Europa comienza a salir de su letargo. Las cadenas de la Santa Inquisición ya no pueden contener el florecimiento espiritual del Renacimiento.

El invento de Guttenberg, la imprenta (1450) —que es ya un producto de ese nuevo despertar intelectual—, proporciona a ese desarrollo su instrumento más importante. En pocos años se instalan cientos de imprentas en las ciudades europeas. El saber se hace accesible a todo el mundo y deja de ser privilegio de unos pocos eruditos enclaustrados tras los muros de los conventos. La Reforma se apoya en este movimiento. La Biblia es traducida a la lengua del pueblo. El camino hacia Dios se ha hecho más directo.

Se produce una avalancha de nuevas técnicas y de nuevos conocimientos. Las armas de fuego aparecen en los campos de batalla y hacen vulnerables fortalezas que hasta entonces habían sido inexpugnables. El orden medieval comienza a tambalearse. Colón descubre un nuevo continente, y la pequeña flota de Magallanes consigue, entre 1519 y 1522, dar la vuelta al mundo. ¡Nuestro planeta es realmente una esfera!

En 1543 las ciencias naturales surgen con nueva fuerza en el campo en donde se dan los mayores enfrentamientos intelectuales. Desde su lecho de muerte. Copérnico hace imprimir su obra, en la que describe la Tierra como un planeta que gira alrededor del Sol.

El estrecho mundo medieval ha quedado resquebrajado; se ha conseguido de nuevo la libertad. Fue algo parecido a un terremoto que agrietó el edificio religioso de la Iglesia. Si existían lugares lejanos en nuestro planeta y se hallaban habitados, y si existían también otros planetas como el nuestro,

¿por qué no había de existir por todo el Universo vida y espíritu humano?

El fraile dominico Giordano Bruno compartía esta opinión. Para él. Dios se convierte en una unidad que abarca un mundo infinito. Dios y el Universo forman una unidad. El protestantismo y el catolicismo se muestran de acuerdo, sin embargo, en rechazar enérgicamente tal herejía.

Cuando Galileo Galilei fue llamado ante el tribunal de la Inquisición —primero en 1615 y después en 1633— a causa de sus trabajos sobre astronomía y se retractó de sus escritos, tenía aún presente la muerte de Giordano Bruno, que fue quemado en la hoguera en el Campo del Fiori de Roma en la mañana del 17 de febrero de 1600. Galileo, en sus escritos, se muestra de acuerdo con la visión del mundo de Copérnico; pero Galileo no tenía madera de mártir. Sin embargo, la verdad conseguiría triunfar.

Mediante *experimentos* y *mediciones,* Galileo había abierto nuevos caminos en la investigación de la naturaleza. Desde la torre inclinada de Pisa dejó caer unas bolas de metal, determinó la duración de su caída y estableció así las primeras leyes cuantitativas de la física. Había comenzado un nuevo período en la historia de la humanidad.

En su fase inicial, las ciencias naturales estaban muy lejos de plantearse el problema del origen de las cosas. Acababan de conseguir superar precisamente ese tipo de cuestiones de naturaleza esencialmente filosófica. Deseaban observar y medir sin prejuicios la naturaleza tal como era, para poder sacar deducciones y conclusiones generales de los datos obtenidos.

La astronomía, volvió a proporcionar impulso al pensamiento moderno de la evolución. A los 31 años, Immanuel Kant publicó, en 1775, una teoría del firmamento según la cual las estrellas y sistemas planetarios se habrían desarrollado a partir de la niebla cósmica. El descubrimiento de la gravedad por Newton (que todas las masas ejercen una fuerza de atracción sobre otros cuerpos) tenía que ser aplicable también a las diminutas partículas de una nube de gas cósmico, de

modo que podían llegar a formarse astros de materia compacta. La teoría de Kant constituye la primera —y todavía vigente— interpretación científica de un fenómeno natural como proceso evolutivo.

También la geología había hecho adelantos. Mediante la observación y el estudio de las formaciones rocosas, de los sedimentos y de la actividad volcánica, se había llegado al convencimiento de que la Tierra se hallaba en un constante, aunque lento, proceso de transformación. También aquí comenzaba a pensarse más bien en la existencia de un proceso evolutivo, sin limitarse a la descripción de un estado permanente de las cosas que se había aceptado hasta entonces.

Uno de los hechos que más interés despertaron fue el descubrimiento de plantas y animales petrificados. Los fósiles daban testimonio de la existencia de especies extinguidas hacía mucho tiempo. Pronto se descubriría también que sólo los estratos más recientes, o sea, los que por lo general se encontraban encima, eran los que contenían organismos superiores (por ejemplo, mamíferos), mientras que las capas geológicamente más antiguas sólo contenían fósiles de organismos más simples o inferiores, como por ejemplo cefalópodos o los antiquísimos trilobites.

Al observar fósiles de especies aún existentes en el momento, por ejemplo, de peces, en toda una serie de estratos de diferente antigüedad, se apreció que los fósiles divergían más de los ejemplares vivos cuanto más antiguos eran los estratos.

Bajo la influencia de las observaciones de los fósiles, los naturalistas empezaron a centrarse cada vez más en la idea de una filogénesis de los seres vivos, en la idea de que existiera un proceso por el cual las especies dieran lugar a otras especies nuevas. La comparación de distintas especies de plantas vivas, o de esqueletos y órganos de animales, reveló tantos paralelismos que indujo a pensar casi automáticamente en la posibilidad de un origen común de todas las especies.

En 1802 un médico inglés publicó un tomo de poemas, *The Temple of Nature (El templo de la naturaleza),* en el que, en forma de hermosos versos, se exponía una visión bastante completa de la evolución: del caos inicial habíanse formado el

Sol y los planetas; después, de un mar original, había surgido de forma espontánea la vida, que, por medio de un desarrollo continuo y gradual, había llegado a producir un ser dotado de razón y habla: el hombre. Este médico era Erasmus Darwin, abuelo del célebre Charles Darwin. Fue también Erasmus Darwin el que planteó las siguientes cuestiones: ¿Cómo es posible la evolución biológica? ¿Cuáles son los motivos que causan el constante proceso de desarrollo de los seres vivos? Su respuesta adelantaba ya algunos puntos importantes para la explicación a la que se llegaría posteriormente: la proliferación de los seres vivos conduce a una dura competición, en la que sólo consiguen sobrevivir los individuos y especies más aptos (el denominado proceso de selección).

Sin embargo, respecto a la cuestión fundamental de por qué se producían las diferencias que posteriormente serían sometidas a la selección en la lucha por la supervivencia. Erasmus —al igual que después Charles Darwin— sólo fue capaz de hacer algunas suposiciones bastante vagas. Aún no se conocían los mecanismos de la herencia genética ni el fenómeno de las mutaciones.

También Lamarck, que en 1809 expondría la primera teoría científica de la evolución, fracasó en ese punto. Al igual que Erasmus y. básicamente, que Charles Darwin, Lamarck creía en la transmisión hereditaria de los caracteres adquiridos y trató de explicar los cambios que experimentaban las especies por el esfuerzo y empeño de los individuos en adaptarse al entorno. El largo cuello de las jirafas, por ejemplo, sería consecuencia de su necesidad de alcanzar las hojas de los árboles para alimentarse. Posteriormente se demostró que esta hipótesis era completamente errónea, pero en su época despertó grandes polémicas, de forma que la propuesta, mucho más importante y correcta, de que las especies superiores descienden de otras especies primitivas, quedó también desacreditada.

A pesar de que a principios del siglo XIX ya se habían hecho algunas hipótesis y especulaciones para explicar la evolución biológica, la ruptura histórica en la línea de pensamiento no se produciría hasta 1859. Charles Darwin, en un viaje de

investigación alrededor del mundo que duró cinco años, había conseguido reunir una gran cantidad de datos, material e información sobre la riqueza y variabilidad de las formas, de las funciones biológicas y de las relaciones de parentesco entre las especies vivas y las fósiles. Cuando, tras su regreso en 1836, comenzó a evaluar el material y la información que había obtenido en su viaje, estaba bajo la influencia del pensamiento de Malthus, según el cual una población de personas o animales va aumentando hasta que su fuente de alimentación deja de ser suficiente para todos. De ello se deduce que toda población está en constante lucha contra el hambre por su supervivencia. Darwin hizo de esta lucha por la existencia uno de los principales pilares de su teoría, y dio una visión del proceso evolutivo muy similar a la de su abuelo, pero respaldada por los innumerables datos que había extraído de sus observaciones y por las pruebas materiales que había reunido. Su idea del proceso evolutivo quedó caracterizada por la famosa frase «*Survival of the fittest*» (acuñada por el filósofo naturalista inglés Spencer): la supervivencia de los que consigan adaptarse mejor al medio ambiente.

A pesar de que ya hacía tiempo que Darwin había elaborado su teoría, al igual que le ocurrió a Copérnico, no se atrevía a publicarla. ¿Era por miedo a derribar alguno de los pilares del credo religioso, o se percató —quizás al igual que Copérnico— de que había algún fallo en su teoría? Quedaba la incógnita que planteaba la inexplicable variedad de seres vivos, cuestión que posiblemente le hubiera gustado resolver primero. Sea como fuere, la publicación de su obra principal, On *the Origin of Species*, se llevó a cabo apresuradamente en 1859, debido a la inminente publicación de una obra muy parecida, cuyo autor, Wallace, había enviado sus trabajos a Darwin para que los valorara. Existían ya suficientes pruebas y datos: había llegado el momento.

Resulta interesante pensar que, en última instancia, fue una cuestión de prestigio, es decir, la necesidad de reconocimiento, lo que impulsó a Darwin a publicar sus observaciones y pruebas de la existencia de un proceso de evolución biológica.

Este factor tiene un papel importantísimo en la motivación de casi todos los científicos. Pero quizás en este breve resumen de la historia de las ideas y teorías sobre la evolución se ha puesto de manifiesto lo difícil que es destacar con claridad los hitos más importantes en el desarrollo y elaboración de una teoría. Al igual que ocurre con cualquier clase de resumen de un proceso histórico, una esquematización de este tipo es necesariamente una simplificación muy burda y, en algunos casos, puede conducir a una distorsión de la realidad. Es imposible considerar todos los pasos o mencionar todos los nombres, y cuantos más se excluyen, más relieve adquieren los pocos que se mencionan.

Al aumentar el número de científicos, arrecia la lluvia de publicaciones y resulta aún más difícil seguir la pista a la red de conexiones intelectuales. Por una parte confluyen datos empíricos, y por otra, interpretaciones teóricas parciales de dichos datos. Algunos científicos consiguen unir y estructurar ideas dispersas; otros se dedican a propagar los conceptos ya existentes mediante una formulación más acertada. La esfera del pensamiento humano se alimenta de un constante surgir de ideas en diferentes individuos y es un entramado de innumerables estímulos recíprocos. Destacar a un individuo en particular supone ensombrecer a otros muchos que contribuyeron a preparar el camino para el surgimiento de una idea, o que incluso formularon esa misma idea de forma menos brillante, menos completa o con más fallos. Para hacer justicia a este entramado de ideas que constituye el pensamiento humano —y que tan importante resulta para nosotros—, en el texto propiamente dicho de esta obra renunciaremos a mencionar el nombre de los científicos a quienes se deban las ideas a que haremos alusión.

A pesar de que en su obra *Sobre el origen de las especies* Darwin sólo hacía vagas alusiones al origen del hombre, pronto aparecieron otros naturalistas que proclamaron abiertamente que el hombre descendía de los simios. Así quedó expuesta de repente esta deducción que, durante décadas, los naturalistas evolucionistas habían considerado, sin atreverse a

proclamar abiertamente. Apareció en los titulares de los periódicos y se convirtió en el principal tema de conversación. Se había superado un tabú. Pero aún pasarían unos cuantos años antes de que el propio Darwin, en una obra de dos volúmenes titulada *The Descent of Man (Los antecesores del hombre)* (1871), aceptara la inevitable conclusión a que conducían sus ideas.

Desde Copérnico, ninguna idea científica había chocado con tanta fuerza contra los dogmas de la Iglesia. Algunos de sus partidarios se vieron obligados a establecer compromisos. Los expertos en la Biblia con inclinaciones filosóficas declararon que la historia de la Creación no debía interpretarse en el sentido de la biología contemporánea, sino más bien en un sentido «existencial»; es decir, que debía interpretarse de forma simbólica. Este nuevo enfoque dejaba campo libre a las ciencias naturales para que discutieran la evolución del «cuerpo» humano. De ahí que muchos, que no fueron todo lo consecuentes que habría sido necesario, consideraran que el estudio de la naturaleza y origen del «alma» quedaba reservado a la teología.

No obstante, la doctrina de la Iglesia, que se apoyaba en el pensamiento medieval, quedó mucho más afectada de lo que la mayoría de los teólogos quisieron admitir. Después de aquello, el desmoronamiento de los dogmas de la Iglesia y su desplazamiento gradual por las ideas científicas fue imposible de detener.

Los nuevos conocimientos fueron acumulándose y rellenando las lagunas que aún existían en la concepción del fenómeno de la evolución. La explicación del mecanismo de la transmisión hereditaria y. sobre todo, de las esporádicas irregularidades que conlleva (mutaciones), permitiría al fin descifrar el problema que Darwin no había llegado a resolver: la causa de la lenta pero constante transformación de todos los seres vivos.

Los argumentos de Darwin habían contribuido a que se concibiera una evolución biológica, es decir, un constante desarrollo de formas de vida superiores a partir de antecesores

primitivos. Pero pese a lo clara que podía haber quedado esta idea, el origen de la vida seguía siendo un misterio envuelto en la niebla de innumerables especulaciones. El impedimento no era "producto de un oculto deseo de dejar que el pensamiento religioso siguiera creyendo en un acto creador como origen de todas las especies: el impedimento provenía de las propias ciencias naturales.

Pocos años después de que Darwin publicara su obra, el fundador de la bacteriología. Louis Pasteur, realizó una serie de experimentos destinados a esclarecer la cuestión de la generación espontánea de bacterias. En 1862 Pasteur llegó a la conclusión de que ni siquiera los microbios podían originarse «por sí mismos», sino que siempre descendían de sus congéneres. Así pues, el origen de la vida seguía siendo un enigma. La autoridad de Pasteur impidió, hasta bien entrado nuestro siglo, que se volvieran a plantear dudas acerca de sus conclusiones. ¿Hasta dónde se extendía el campo de validez de sus experimentos?

¿No sería posible que —según el hombre había creído siempre— al principio de la historia de nuestro planeta se hubiera producido una «generación espontánea» de estructuras vivas primitivas a partir de la materia inerte? En aquellos tiempos las condiciones físicas y químicas bien pudieron haber sido muy diferentes de las creadas por Pasteur en su laboratorio, y. sobre todo, se disponía de mil ones de años, y no de días o semanas, para que el milagro pudiera ocurrir.

La ciencia dedujo una última consecuencia. Se investigaron paso a paso las enigmáticas funciones de las células y se observaron las reacciones químicas de moléculas complejas; cada vez parecía menos posible que pudiera existir una influencia externa que actuara sobre las moléculas. Cada vez eran más los científicos que consideraban seriamente, apoyándose en cifras y fórmulas químicas, la posibilidad fisicoquímica de una generación espontáneas el surgimiento de la vida sin la intervención de Dios. Hoy los científicos dicen:

«La evolución de la vida ha de ser considerada como un proceso inevitable» (Eigen).

Y según ellos ese proceso se debe al azar. Fue por azar, por un feliz encuentro casual de las estructuras moleculares adecuadas, por lo que se originó la vida.

«El puro azar, y *nada más que el azar, la libertad absoluta* y *ciega, es lo que constituye el fundamento de ese maravilloso edificio que es la evolución»* (Monod).

Por tanto, no fue un acto divino, sino un proceso molecular casual y sin meta definida. El hombre ya no es la coronación de la Creación, a imagen y semejanza de Dios; ya no es parte del plan de una divinidad omnipotente, sino que:

«El hombre no es más que un producto —aunque un producto muy especial— de una secuencia de ciegas casualidades y *"amargas necesidades.» «La esencia de la evolución es la ausencia de todo motivo o finalidad»* (Luria).

La naturaleza se nos presenta, por tanto, como una maquinaria sin sentido o finalidad. ¿Acaso hemos tenido que pagar por esta nueva libertad espiritual con el sentido de nuestra existencia? Ahí, en la penumbra de su saber, queda el hombre: desarraigado en medio de un Universo frío e infinito, perdido en una cadena de generaciones que surgieron de la nada y hacia la nada van. ¿Y para qué?

Tal vez sea ésta la ansiada meta del conocimiento; la última gran respuesta a todas las preguntas que el hombre hace a la naturaleza. El hombre, a través de experimentos, ha conseguido, «liberarse» de aquel orden jerárquico derivado de la noción medieval de un Universo estático gobernado por un ser supremo, y ha perdido la sensación de recogimiento espiritual que esta concepción le proporcionaba.

La ciencia ha superado las barreras espirituales, pero, tras esas barreras, ha encontrado el vacío y el sinsentido existencial.

El hombre, ese ser vivo dotado de razonamiento lógico-causal que ya no cree en milagros, se siente abandonado y solo.

El hombre moderno evita reflexionar sobre el sentido de su existencia. La vida moderna le ofrece otros muchos temas de que preocuparse sin dejarle tiempo para reflexionar. El hombre ha llegado a convertir en un nuevo tabú la pregunta

sobre el sentido de su existencia y pone toda clase de impedimentos a sumergirse en esta clase de pensamientos. Y no se atreve a hacerlo porque teme encontrarse con la descorazonadora conclusión de que; *la vida carece de todo sentido.*

Este libro quiere ser una ayuda para que, a través de la *ciencia,* podamos volver a recuperar el sentido de nuestra existencia que, a todas luces, hemos perdido por culpa de esa misma ciencia. Este libro intenta demostrar que la *totalidad* de nuestros conocimientos puede permitimos adoptar una nueva perspectiva: el conocimiento de la naturaleza y el sentido de nuestra existencia no están en contradicción.

Por tanto, no perdamos de vista nuestra meta mientras hacemos nuestro recorrido (de muchos capítulos) a través de la física, la química, la biología orgánica y la biología molecular: ni cuando consideremos el funcionamiento de nuestro cerebro, el comportamiento de los animales o el fenómeno del lenguaje humano. Es necesario recorrer ese largo camino para que podamos damos cuenta de que la naturaleza en su totalidad evoluciona constantemente, rigiéndose siempre por los mismos principios básicos, de que todo desarrollo es evolutivo y se produce gradualmente, significando cada grado un nivel superior de complejidad:

Podremos apreciar cómo, con cada fase de dicho proceso, se produce una «integración», es decir, una agrupación de unidades “hasta entonces Independientes para formar una nueva unidad con nuevas propiedades y posibilidades. Siguiendo esa cadena de consecutivas integraciones, nos encontraremos por dos veces con un eslabón especial: un umbral hacia nuevas posibilidades que nos permitirá vislumbrar nuevas e inimaginables perspectivas. En este proceso de desarrollo, es decir, de aumento gradual de la complejidad, se experimentó dos veces una tremenda aceleración, y las dos veces se inició algo completamente nuevo; algo que no existía hasta entonces: La primera vez fue la transición de la primera fase —de desarrollo *material*— a la segunda fase — *de* desarrollo *biológico*— de la evolución: la segunda, cuando se produjo el salto de esta segunda fase biológica a una tercera fase de

desarrollo *intelectual, e*n cuyos comienzos nos encontramos actualmente.

Nuestro recorrido por las ciencias naturales, sobre todo en la primera parte de este libro, no resultará un paseo fácil para los egos en la materia. Puesto que tratamos muchas veces de estudiar los conceptos básicos de muchas ramas de la ciencia con una profundidad que nos permita llegar a un planteamiento serio, puede darse el caso de que, en una primera lectura, el lector encuentre difíciles algunos argumentos o algunos términos científicos. Pero eso no tiene que desanimamos, puesto que jodo se aclarará al considerarlo dentro de un contexto global. Cualquier persona ajena a las ciencias naturales está mucho más capacitada para comprender los aspectos básicos de estas ciencias y sus enormes consecuencias, de lo que ella misma podría creer. Muchos aspectos de las «ciencias avanzadas» se hacen comprensibles para cualquier persona seriamente interesada en cuanto se despojan de su envoltura enrevesada de jerga científica y fórmulas. Los principios básicos de cualquier ciencia no son difíciles de comprender.

En la última década el público ha empezado a demostrar cada vez más desconfianza hacia la ciencia. El motivo de tal desconfianza radica en un sentimiento inconsciente de «desarraigo espiritual» y en un miedo consciente y justificado hacia la aplicación irresponsable y a menudo inhumana de la tecnología. A pesar de que los científicos consideran que sus logros son de signo «neutro», también entre ellos hay muchos que están seriamente preocupados y que se preguntan si la humanidad tiene la suficiente madurez moral para asumir con responsabilidad el poder que le confieren sus nuevos conocimientos. Pero esa preocupación no les impide seguir contribuyendo diariamente a una acumulación del saber. Los científicos —de acuerdo con la filosofía clásica— siguen considerando la ampliación del saber como algo positivo en sí, a pesar de que no pueden justificar «científicamente» esta postura. A lo largo de este libro nos ocuparemos también de esta cuestión y trataremos de enfocarla desde una perspectiva más amplia. Quizás así contribuiremos en cierto modo a salvar ese

abismo cada vez más profundo que se abre entre la tecnología y la humanidad.

Volvamos ahora a nuestro itinerario. Queremos obtener una visión de la evolución que arranque de los orígenes del Universo y que, como una cadena de innumerables eslabones, nos vaya conduciendo hacia un lejano futuro. Sólo hacia el final de nuestro trayecto nos preocuparemos de considerar la posible dirección y necesidad de tales acontecimientos; sólo entonces nos preguntaremos por el sentido de la existencia del hombre.

EVOLUCIÓN DE LA MATERIA

1. EL ESCENARIO: ESPACIO-TIEMPO, ASTROS, GALAXIAS

> «Antes de la Creación no había ni tiempo ni duración.»
>
> SPINOZA

Cuando en una noche despejada miramos hacia las estrellas, no solemos damos cuenta de que mirar hacia el espacio es mirar hacia el pasado. En ese espacio infinito no vemos lo que está ocurriendo «ahora», sino lo que ocurrió «antaño», cuando fue emitida esa luz que hoy podemos ver.

La luz no se propaga a una velocidad ilimitada, sino que, al igual que otras ondas, como las de radio o televisión, tiene «sólo» una velocidad de 299.792.456,2 metros por segundo. La velocidad de la luz es considerada una constante universal y, según la teoría de la relatividad, es la máxima velocidad que puede alcanzar una señal en su propagación, o una nave espacial en su recorrido, independientemente de la potencia de su fuerza motriz.

La limitación de la velocidad de propagación puede apreciarse actualmente en las conversaciones por radio que mantienen los astronautas desde la Luna con la base espacial de la Tierra. Entre la pregunta emitida desde la Tierra y la respuesta que se recibe de la Luna, transcurre un intervalo de 2,6 segundos, puesto que las ondas de radio necesitan algo más de dos segundos para recorrer la distancia que separa la Luna de la Tierra (unos 384.000 km).

Los rayos del Sol necesitan unos ocho minutos para llegar a la Tierra. Esto significa que en los últimos minutos del crepúsculo, el Sol está «en realidad» por debajo de nuestro horizonte. Vemos el Sol en donde estaba hace ocho minutos, no en donde se encuentra «ahora».

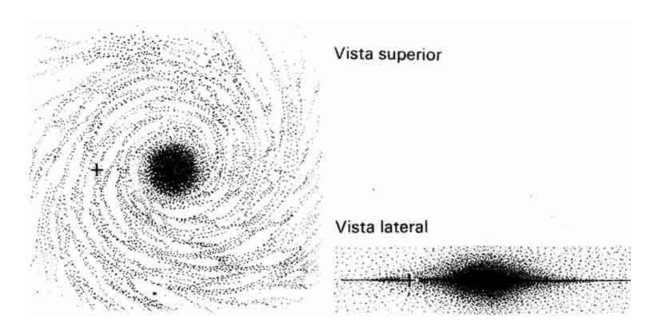
Vamos a emprender un viaje mental de exploración por el Universo. Una nave espacial que viajase a la velocidad de la luz dejaría atrás en pocas horas la órbita del planeta más lejano. Plutón. Después empezaría una travesía monótona por un espacio casi vacío en el que sólo encontraría algunos átomos, alguna molécula o. tal vez, alguna partícula de polvo. Sólo al cabo de cuatro años, nuestra nave espacial comenzaría a aproximarse a la estrella más cercana a nuestro sistema solar: Alpha Centauro. La astronomía utiliza la velocidad de la luz como referencia para medir las distancias. Se dice, por tanto, que Alpha Centauro se encuentra a 4,3 años luz de nosotros (1 año luz = 9.460.000.000.000 km). Nuestra nave podría seguir viajando de una estrella a otra y se encontraría, por término medio, una nueva estrella cada 5 o 10 años. Si navegara hacia la parte del Universo en que nosotros apreciamos un mayor número de estrellas, al cabo de unos 30.000 años conseguiría llegar al aún enigmático centro de nuestra galaxia, del que sabemos tan poco debido a que es imposible «sondearlo» a causa de la gran cantidad de astros y nubes de gas que en él se encuentran.

Hace ya milenios que los astrónomos intentan medir el firmamento en todas direcciones, y desde hace aproximadamente doscientos años sabemos que nuestra «Vía Láctea» es una espiral plana compuesta por innumerables astros luminosos. Su espesor alcanza hasta 20.000 años luz, y su diámetro hasta unos 100.000 años luz. Según las estimaciones realizadas, esa espiral está compuesta aproximadamente por 150.000 millones de estrellas similares al propio Sol.

Nuestra situación en el Universo no tiene nada de particular en ningún sentido. El Sol no se encuentra en el límite de esta galaxia y menos aún en su centro, sino aproximadamente en el lugar que señalamos con una crucecita en el dibujo.

Sin considerar unas 300 pequeñas aglomeraciones de estrellas que se hallan desperdigadas en él, el espacio que rodea a nuestra galaxia está completamente vacío. El próximo complejo de una dimensión parecida es la galaxia conocida con el nombre de Andrómeda. Para llegar a ella necesitaríamos viajar 2,2 millones de años a la velocidad de la luz. A pesar

de esta enorme distancia, la potencia de la irradiación de sus más de 200.000 millones de soles nos permite divisar vagamente a Andrómeda a simple vista desde nuestra Tierra. Pero recordemos que esa luz que percibimos surgió de esa galaxia cuando nuestros antepasados comenzaban a afilar sus primeras herramientas de piedra.



Nuestra galaxia, Andrómeda y aproximadamente otras veinte galaxias pequeñas, forman una especie de «grupo local». Por así decirlo, somos «vecinos» de un barrio de este inmenso Universo.

Allá donde dirijamos nuestro telescopio encontraremos, a intervalos aún mayores, miles y miles de otras galaxias. Todas ellas se encuentran agrupadas en «colonias». Existen grupos pequeños como el nuestro, pero también otros que se componen de miles de galaxias cada uno. En todas direcciones podríamos encontrar más galaxias que estrellas tiene la nuestra. Los astrónomos calculan que al alcance de nuestros telescopios hay más de 100.000 millones de galaxias. Naturalmente, sólo una ínfima parte de ellas ha podido ser estudiada y medida hasta el momento.

Los modernos telescopios y radiotelescopios nos han permitido divisar galaxias hasta una distancia de 11.000 millones de años luz, es decir, aproximadamente a

$$100.000.000.000.000.000.000.000 = 10^{23} \text{ km.}$$

Las más lejanas son las denominadas quásares (objetos casi estelares), algunos de los cuales emiten ondas electromagnéticas (u ondas de radio) de gran intensidad, y es posible que no sean más que enormes explosiones en su estadio inicial de evolución, antes de dar lugar a otras galaxias; estos fenómenos siguen constituyendo aún un misterio para la astrofísica.

Para obtener una idea de la magnitud de las distancias cósmicas, podemos hacer un dibujo a escala en el que la distancia entre la Tierra y la Luna equivalga a un milímetro. A esta escala el Sol estaría situado a 40 cm y Alpha Centauro a 100 km de distancia.

Si para un segundo dibujo tomamos la distancia entre la Tierra y Alpha Centauro y hacemos que equivalga a 1 mm, nuestra galaxia tendría entonces un diámetro de unos 20 cm y los cuerpos celestes más lejanos que conocemos hasta ahora estarían a una distancia de 2.800 km.

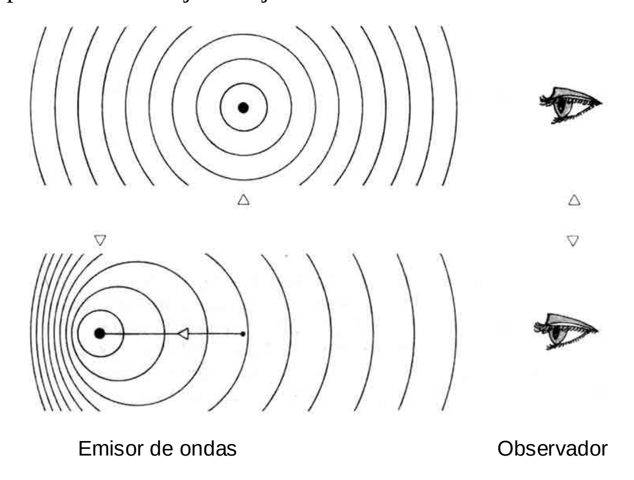
A la distancia de 11.000 millones de años luz, la frecuencia de galaxias o quásares desciende bruscamente. ¿Es que nuestros telescopios ya no alcanzan más? ¿O acaso no es la profundidad del espacio el problema, sino la inmensa cantidad de tiempo que ha transcurrido desde que se comenzaron a propagar las ondas electromagnéticas que ahora recibimos? ¿Estamos observando el pasado en el que se formaron las primeras galaxias? ¿Es que a una distancia —digamos— de 15.000 millones de años luz no podemos observar ninguna galaxia porque hace 15.000 millones de años todavía no existía ninguna galaxia? ¿Tiene el Universo un principio? La respuesta a este interrogante depende exclusivamente de una extraña observación de la luz que nos llega de las lejanas galaxias: del denominado corrimiento hacia el rojo.

Todos los cuerpos calientes emiten ondas de luz de determinados colores (es decir, ondas de determinadas longitudes) que dependen del tipo de átomos del cuerpo en cuestión. Basándose en el estudio de estas «líneas del espectro» se puede determinar la composición atómica de estrellas y galaxias. En la observación de las galaxias más lejanas se ha podido comprobar que, aunque existen las líneas espectrales acostumbradas —como, por ejemplo, las del hidrógeno—,

todas ellas aparecen con un extraño corrimiento hacia el rojo (u ondas de mayor longitud) dentro del espectro.

Y lo que es más, cuanto más distante de nosotros se halla la galaxia, mayor es el corrimiento hacia el rojo. La interpretación de este fenómeno resulta de suma importancia para la comprensión del Universo.

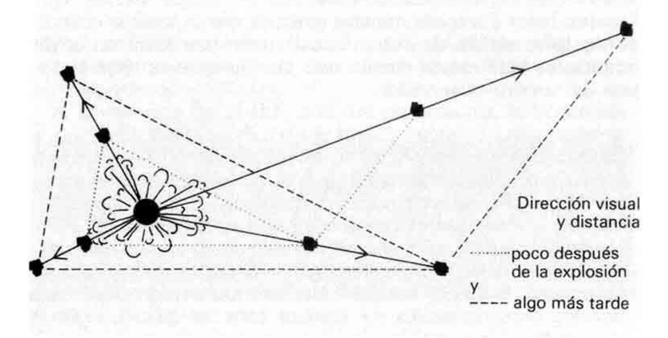
Sirviéndonos de un modelo, expongamos brevemente la explicación del denominado «efecto Doppler», aceptado por casi todos los científicos: en una superficie tranquila de agua, el movimiento continuo de un cuerpo hacia arriba y hacia abajo produce ondas que se propagan en círculos concéntricos desde su punto de origen. Pero si el objeto que causa las ondas se mueve al mismo tiempo en una dirección constante, las olas u ondas se comprimen en la dirección del movimiento y se ensanchan en la dirección opuesta. Un observador que contara las olas que llegaran hasta él a cada minuto, contaría menos crestas cuando el objeto se alejara de él que cuando estuviera estático. La diferencia se hará mayor cuanto más rápidamente se aleje el objeto de nuestro observador.



Lo mismo podría aplicarse a una galaxia que estuviera alejándose de nosotros y cuyas emanaciones de luz estuviéramos observando. Las ondas de luz que observaríamos estarían

distorsionadas. Veríamos ondas «alargadas»; es decir, ondas luminosas que tenderían hacia el campo del rojo.

Según esta interpretación, todas las galaxias se estarían alejando de nosotros; con más velocidad cuanto más distantes se hallen («la huida de las galaxias»), A primera vista podría parecer de nuevo que nuestra Tierra se hallara en el centro del Universo, desde el cual todo parece alejarse. Sin embargo, no es difícil comprender que cuando se produce la explosión de una granada, desde cada uno de los trozos de metralla todos los demás trozos parecen alejarse; con mayor velocidad aquellos que se hallan más distantes.



Esta comparación nos lleva directamente a la teoría cosmológica que mayor aceptación tiene actualmente entre los científicos: la teoría de la «gran explosión» *(Big Bang)*, según la cual toda la materia de nuestro Universo habría salido despedida en todas direcciones por la explosión de un cuerpo extraordinariamente denso:

Para hacemos una idea podemos imaginar una membrana de goma elástica que pudiera estirarse infinitamente en todas direcciones. Si marcamos algunos puntos en la goma, observaremos que al estirarla aumenta la distancia entre ellos. Cuanto más separados estén los puntos a más velocidad se distanciarán. Esto que imaginamos para una membrana bidimensional aplicado al espacio tridimensional nos daría una idea del Universo, que fue el resultado de una explosión original y que todavía hoy sigue expandiéndose.

Al principio habría una temperatura extremadamente alta, que iría descendiendo al irse expandiendo el espacio. Al cabo de 0,01 segundos, la temperatura sería «sólo» de 100.000 millones de grados. Según esta teoría, después de la explosión, el Universo sería «una sopa de materia y radiaciones» (Weinberg).

Aunque resulte fascinante desarrollar la teoría de la explosión original, no es demasiado importante para la línea de pensamiento que queremos seguir en este libro. Podemos limitamos a considerar que nuestro Universo tuvo un principio en el que, debido a las enormes temperaturas existentes, no era posible que hubiera ninguna clase de estructuras. En un principio no existían ni átomos ni galaxias. Sólo después de producirse un enfriamiento gradual, la materia del Universo pudo aglutinarse —obedeciendo a la atracción de las masas (gravedad)— y formar estrellas y galaxias.

Calculando retrospectivamente las distancias y la «velocidad de huida» de las galaxias, es posible calcular la edad del Universo, es decir, el momento en el que se produjo esa explosión original. Según estos cálculos, la edad del Universo es de 13.000 millones de años o, según los cálculos más recientes, de 20.000 millones de años. Lo que pudo haber *antes* de la explosión original es una cuestión que no tiene sentido para la ciencia. En cambio, sí tiene sentido preguntarse —aunque de momento no es posible encontrar una respuesta— si el Universo es finito o infinito. La idea de la explosión original es compatible con ambas posibilidades.

Pero por muy fascinantes que resulten estas teorías cosmológicas, siempre hay que considerarlas con relativo interés y ciertas reservas. En las últimas décadas, las observaciones e investigaciones de los científicos han provocado cambios radicales de opinión en importantes cuestiones. Todas las teorías cosmológicas se basan forzosamente en hipótesis —por ejemplo, en la hipótesis de que exista una simetría— que, si bien pueden resultar muy atractivas estéticamente, no pueden ser demostradas; probablemente son indemostrables por naturaleza. Se habla también de toda una serie de «constantes naturales» (la de la gravedad, la velocidad de la luz, la cons-

tante de Plank, etc.) que son siempre magnitudes medidas «aquí y ahora». La ciencia parte del supuesto —que puede ser perfectamente válido— de que dichas constantes pueden aplicarse en todo el Universo y en cualquier momento; por eso se denominan *constantes naturales.* Sin embargo, esto no parece ser tan seguro. Tintos últimos cuarenta años han surgido nuevos puntos de vista que tienden a cuestionar dichas constantes naturales. De todas formas, hasta el momento, todas las hipótesis en este sentido han podido ser refutadas o calificadas de improbables al contrastarlas con las observaciones empíricas.

Vemos, por tanto, que la credibilidad de cualquier teoría cosmológica depende, por una parte, de lo plausibles que resulten sus hipótesis básicas y, por otra, de las observaciones empíricas que puedan ser interpretadas sin dificultad a la luz de la teoría.

2. DEL HIDRÓGENO Y DE LOS SOLES

«Creación significa unificación.»

TEILHARD DE CHARDIN

Después de haber oteado el horizonte en nuestro viaje imaginario y de haber echado un vistazo al escenario en que tiene lugar toda la evolución, vamos a centramos ahora en lo más pequeño: vamos a considerar la materia de la que se compone ese inconmensurable Universo.

Ya hemos comentado que la descomposición de la luz de los cuerpos celestes más lejanos en los colores del espectro nos proporciona información acerca de su composición atómica, por tanto, se puede preguntar: ¿De qué elementos químicos se compone la materia que existe en el Universo? ¿Son los mismos que encontramos en nuestro planeta, o son otros?

También aquí se confirma la homogeneidad del Universo. En todo el cosmos podemos reconocer los mismos átomos que los químicos y los geólogos han identificado en nuestro planeta. Al parecer, el sistema periódico de los elementos, que establece un orden para la enorme variedad de átomos estables, es válido para todo el Universo.

Sin embargo, nos encontramos con una sorpresa. Si calculamos la frecuencia con que aparecen los diferentes tipos de átomos (véase la tabla siguiente) podemos observar que nuestro Universo se compone en casi un 99% de dos elementos: hidrógeno y helio. Vivimos en un Universo compuesto por hidrógeno y helio en el que todos los demás elementos podrían ser considerados «impurezas».

Resulta además que el átomo de hidrógeno es el átomo más simple. Está compuesto por un protón, el núcleo atómico, y un único electrón que se mueve vibrando a su alrededor. El helio es el segundo elemento más simple, y está compuesto por dos electrones que «bullen» alrededor de su núcleo ató-

mico. El Universo se compone casi exclusivamente de los dos tipos de átomos más simples.

1. Concentraciones relativas de los diferentes tipos de átomos en el Universo

Por cada	1.000.000 de átomos de hidrógeno
hay	160.000 átomos de helio
	700 átomos de oxígeno
	600 átomos de neón
	300 átomos de carbono
	100 átomos de nitrógeno
	30 átomos de silicio
	30 átomos de magnesio
	20 átomos de azufre
	10 átomos de hierro
	5 átomos de argón
	2 átomos de aluminio
	2 átomos de sodio
	2 átomos de calcio
y menos de	1 átomo de todos los demás elementos

Puesto que nos interesa la evolución, surgen inmediatamente algunas preguntas: ¿Tenía el Universo desde el principio esta composición atómica, o pueden haberse producido alteraciones? ¿Se crean átomos más complejos a partir del hidrógeno? Para encontrar la respuesta tendremos que estudiar primero el «historial» de las estrellas.

La astrofísica ha logrado llegar a conocer, utilizando diferentes métodos, el proceso de formación de las estrellas. Este pro ceso se inicia con enormes y turbulentas nubes de gas de hidrógeno y polvo cósmico procedente de las explosiones de antiguos cuerpos celestes. Por la atracción de las masas, estas nubes van concentrándose hasta formar una nube con una rotación lenta que, finalmente, se contraerá hasta formar una densa bola de gas, adquiriendo en este proceso cada vez mayor velocidad de rotación. Éste es un fenómeno conocido por cualquier patinador sobre hielo: al apretar los brazos contra el cuerpo se consigue una mayor velocidad de rotación (mantenimiento del impulso de rotación).

Los átomos, atraídos por la fuerza de la gravedad hacia el centro de la bola, chocan unos con otros produciendo energía en forma de calor. El centro se pone al rojo vivo y cuanto más crece la estrella, más átomos se precipitan hacia su centro, y más se eleva la temperatura del mismo. Cuando la masa de gas es lo suficientemente grande, la temperatura puede aumentar hasta llegar al valor crítico de aproximadamente un millón de grados.

Al alcanzar esa temperatura crítica se producen unas circunstancias altamente dramáticas que, por así decirlo, dan lugar al nacimiento de la estrella. Una vez alcanzada dicha temperatura comienza a desarrollarse, al principio lentamente y después de forma más acelerada, un proceso diferente de calentamiento de la estrella. Se «abre» una nueva fuente de energía. En el interior de la bola ardiente los núcleos de los átomos de hidrógeno chocan entre sí con tal fuerza que se llega a producir una reacción nuclear, una fusión de los núcleos de los átomos de hidrógeno. Es un fenómeno muy parecido a la explosión de una bomba de hidrógeno. Esta reacción libera grandes cantidades de energía. Más abajo nos ocuparemos de los detalles de esta fusión nuclear, pero antes vamos a ver en qué acaba convirtiéndose nuestra ardiente bola de gas.

La energía producida y liberada por la reacción nuclear que tiene lugar en el centro de la estrella es expulsada hacia el exterior, oponiendo su fuerza a la fuerza de la gravedad que ejerce la masa de gas. Cuanto más grande sea la bola de gas, es decir, cuanto mayor sea la presión de la materia hacia el interior, mayor temperatura alcanzará su centro. Con el aumento de la temperatura aumentará también el número de reacciones nucleares, cuya energía y radiación se oponen a la presión que se ejerce desde el exterior. De esta forma llega a establecerse al fin un equilibrio; la energía nuclear que se produce en el interior (que es irradiada a través de la superficie) llega a compensar la presión generada por la fuerza de la gravedad de la masa. Una vez establecido este equilibrio, la ardiente bola de gas deja de consumirse; la estrella ya es un cuerpo estable.

Las estrellas pequeñas se calientan menos que las grandes, puesto que llegan a compensar la fuerza de la gravedad de sus masas más pequeñas con una menor producción de energía nuclear en su interior. Por tanto, esas estrellas pequeñas consumen su energía nuclear mucho más despacio. Su fulgor es rojo oscuro («enanas rojas») y se mantienen «vivas» durante muchísimo tiempo; mucho más tiempo que, por ejemplo, nuestro Sol. Éste es una estrella de tamaño medio y, por tanto, de las denominadas «estrellas calientes», que proyectan una luz clara (espectro amarillo o central) y consumen su energía con relativa rapidez. Dentro de unos 5.000 millones de años, cuando todo su combustible atómico haya quedado convertido en «cenizas», nuestro Sol entrará en una fase crítica.

Aún mucho más calientes, y por tanto con una vida más corta, son las estrellas denominadas «gigantes azules». Su enorme masa implica un consumo mucho más rápido de su energía atómica. Se conocen muy pocas de estas «gigantes», puesto que sólo podemos observar aquellas que han nacido «recientemente» y que, por tanto, siguen irradiando luz. Las más antiguas ya se han apagado. En cambio, las estrellas más pequeñas y medianas —rojas y amarillas, respectivamente— pueden ser jóvenes, de edad mediana e incluso muy viejas.

Este capítulo podría haberse titulado también «El comienzo del hilo rojo», puesto que con las reacciones nucleares que se producen en el interior de las estrellas hemos encontrado el comienzo de un proceso que estudiaremos a lo largo de todo este libro; la formación de unidades más complejas a partir de componentes totalmente simples.

Las «partículas elementales» son los componentes más pequeños que forman toda materia. (Incluso en el caso de que también esas partículas estuvieran a su vez formadas —según empieza a sospechar la física moderna— por «quarks»[1], esto no alteraría en absoluto la argumentación expuesta en este

[1] Designación arbitrariamente atribuida a las subdivisiones de las partículas elementales cuya existencia no ha sido demostrada.

libro.) Se conocen actualmente una gran cantidad de partículas elementales que pueden reaccionar entre sí y combinarse espontáneamente para formar otros tipos de partículas. Las tres partículas elementales más importantes, las que menos se prestan a transformaciones y. per tanto, las más estables, son:

El *protón,* que forma el núcleo del átomo de hidrógeno y constituye casi toda su masa. Su carga eléctrica se considera como la unidad de carga, atribuyéndosele el valor 1. Su vida media —es decir, el tiempo que transcurre antes de que se transforme— es de 10^{35} segundos; o sea, 200.000.000.000.000.000 veces la edad actual del Universo (5×10^{17} segundos).

El *electrón,* que contiene sólo aproximadamente 1/2.000 de la masa del protón y tiene una carga negativa, es decir –1, es, por su estabilidad, la segunda partícula elemental que conocemos. Tiene una vida media de 10^{28} segundos. (El «positrón», que es parecido al electrón, pero con carga positiva, es mucho más efímero.)

El *neutrón* tiene aproximadamente la misma masa que el protón, no tiene carga elemental y es la tercera de las partículas más estables, a pesar de que su vida media sólo es de 8 minutos.

(La cuarta partícula estable que conocemos, el mesón, μ, tiene una vida media de sólo 10^{-6}; segundos; todas las demás partículas tienen una vida media más corta.)

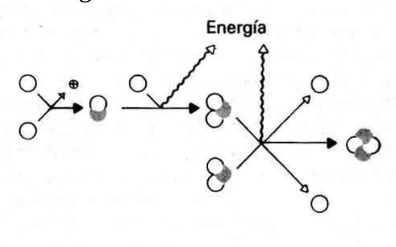
Los neutrones y los protones son los elementos básicos del núcleo de los átomos. Los protones pueden convertirse en neutrones (y viceversa), y en este proceso se consume (o se genera) energía, dando lugar a que un positrón (o electrón) se separe del átomo.

Para nuestro estudio también resulta necesario considerar las *partículas* α, que están formadas por una unión muy estable de dos protones y dos neutrones, lo que constituye el núcleo del átomo de helio.

Con esto hemos conocido a los principales protagonistas del proceso original de la producción de energía nuclear y podemos volver a dirigir nuestra mirada al interior de las estrellas.

Bajo la tremenda presión de la fuerza de la gravedad y con la consiguiente elevación de la temperatura, los átomos de hidrógeno de nuestra bola de gas pasan a una especie de estado líquido (plasma) en el cual todos los electrones y protones se mueven libremente y chocan entre sí. Cuando la temperatura del plasma supera el millón de grados —y es precisamente aquí y ahora cuando encontramos el hilo rojo— se produce ocasionalmente la colisión de dos protones, con tal fuerza que uno de ellos se transforma en un neutrón y, al mismo tiempo —y esto es lo más importante del proceso —, ambas partículas se funden, formando un solo núcleo atómico. Este núcleo es estable, a pesar de que algunos neutrones individuales se convierten rápidamente en protones. Si no se produjera la estabilización de los neutrones mediante su unión con protones, no se daría ningún tipo de evolución.

Cuando se produce la colisión de este nuevo núcleo con otro protón, éste se integra también al sistema, y en este proceso se libera energía. Este núcleo, que ahora se compone de tres partículas, sigue su cadena de reacciones: cuando colisiona con otro núcleo triple se produce, tras liberarse dos protones individuales, un núcleo de helio, es decir, la partícula a de que hemos hablado antes. También en este caso se libera una gran cantidad de energía.



En este proceso, denominado «ciclo de protón a protón», participan por tanto seis núcleos de hidrógeno, de los cuales cuatro se funden para formar un núcleo de helio, desprendiendo una energía del orden de 24 M*e*V. Este proceso es el responsable de que las estrellas empiecen a brillar, y es el

principio y origen de toda evolución: el primer eslabón de una larga cadena que lleva hacia un desarrollo cada vez más complejo.

3. SU FULGOR ES EVOLUCIÓN

> «Mientras tanto, todo está determinado por leyes generales; leyes que impone la naturaleza por medio de la combinación de las fuerzas originales que en si misma encierra.»
>
> KANT

Si se establece la proporción de protones y partículas *a* existentes en el Sol y se mide la cantidad de energía irradiada por segundo, podríamos establecer, basándonos en su proceso de fusión nuclear, la edad del Sol; es decir, el momento en que se formó por condensación de una nube de gas de hidrógeno. Por este medio se ha podido determinar que el Sol tiene una edad de 4.600 millones de años. Prácticamente es ésta la edad de todo el sistema planetario al que pertenece la Tierra, y así se ha podido comprobar por diferentes métodos.

Aún no se sabe con seguridad cómo se formaron los sistemas planetarios. La antigua teoría de que una estrella al pasar habría arrancado trozos del Sol puede considerarse falsa. Hoy día se considera que la nube de gas que dio origen a nuestro sistema planetario tenía una rotación acelerada y que, debido a la fuerza centrífuga, los átomos más pesados que se encontraban en el plano ecuatorial fueron expulsados hacia el exterior. La parte central, que posteriormente se comprimió hasta convertirse en el Sol, experimentó por ello un descenso en su velocidad de rotación (el efecto contrario al del patinador que encoge los brazos), mientras que la materia que había salido despedida y que giraba alrededor fue comprimiéndose hasta formar los planetas, que siguen manteniendo su órbita en el plano ecuatorial del Sol.

Puesto que hasta ahora el Sol ha consumido sólo una parte muy pequeña de su reserva de protones, seguirá dándonos su luz durante muchos miles de millones de años. Sin embargo, no podrá mantener durante tanto tiempo su actual equilibrio.

Según los cálculos de los astrofísicos, dentro de unos 4.000 o 5.000 millones de años el Sol debería entrar en una fase crítica.

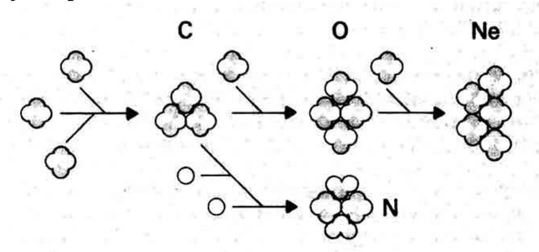
El motivo de que se produzca un desequilibrio al cabo de miles de millones de años de una radiación regular es la acumulación de «cenizas», es decir, de núcleos de átomos de helio que se han ido produciendo y acumulando a lo largo del proceso de reacción nuclear. Por su gran densidad, estos residuos tienden a acumularse en el centro de la esfera de gas, lo que implica que la zona principal de combustión se vaya desplazando lentamente hacia fuera. Como ocurría con la primera «ignición», la caída de núcleos de helio hacia el centro de la estrella produce una energía adicional que, tras un largo período de irradiación, comienza a acumularse. Esto hace que la estrella empiece a perder su equilibrio, puesto que el aumento de la temperatura del interior fomenta enormemente la frecuencia de las reacciones nucleares, que, a su vez, generan aún más calor. La presión que causa la irradiación de la energía acumulada en el interior llega a ser mucho mayor que la presión de la gravedad que ejercen las capas externas de la estrella y, en consecuencia, la esfera de gas comienza un proceso de distensión que hace que aumente su tamaño en enormes proporciones. La estrella se «inflama» hasta convertirse en una *gigante roja*.

En su interior se siguen consumiendo cada vez más rápidamente las reservas de protones. La temperatura sigue aumentando y la malla de helio se hace cada vez más densa. Sin embargo, todo este proceso no es más que el preámbulo para el comienzo de una nueva cadena de reacciones nucleares que se dará cuando se hayan alcanzado los 110 millones de grados. A esta temperatura los residuos que hasta ahora habíamos considerado «cenizas» vuelven a servir de combustible. Es ahora cuando los núcleos de helio se combinan —liberando de nuevo grandes cantidades de energía— para formar unidades más complejas.

Hay que señalar, sin embargo, que no es posible una combinación duradera de dos núcleos de helio, puesto que tienden a volver a separarse. Sólo cuando colisionan y se aparean a

temperaturas muy elevadas puede darse el caso de que antes de volver a separarse choquen con una partícula a. Si esto llega a ocurrir, los tres núcleos se asocian de forma *estable* formando un núcleo de carbono.

Con este proceso se ha traspasado de nuevo otro umbral: el núcleo de carbono pronto atraerá e integrará a otra partícula a, convirtiéndose en un núcleo de oxígeno que, a su vez, por asimilación de otra partícula a, podrá convertirse en un núcleo de neón. Por otra parte, si a un núcleo de carbono se le añade primero un protón y luego otro, se produce un núcleo de nitrógeno. (Compárese este proceso gradual de fusiones nucleares con la frecuencia de los elementos que figura en la tabla 1. Cuando menos avanzados se hallen en la cadena de combinaciones, mayor es su incidencia.) El hilo rojo de la evolución, es decir, de la estructuración progresiva de unidades más complejas a partir de elementos básicos, comienza a avanzar.



Todas estas fusiones nucleares hacen que se libere una energía adicional en forma de calor. La temperatura sigue aumentando. Al alcanzar aproximadamente los 800 millones de grados, el núcleo de neón se encuentra en condiciones de poder asimilar otra partícula α, dando lugar a un núcleo de magnesio. Al alcanzarse los 1.500 millones de grados se constituyen también núcleos de silicio, aluminio, azufre y fósforo. Ahora se dan simultáneamente toda una gama de reacciones nucleares. En el interior de la estrella la temperatura sigue aumentando. Se configuran núcleos atómicos cada vez más complejos.

Cuanto más se diversifican estas reacciones, más difícil es poder predecir el desarrollo global de la estrella. Lo que se

sabe es que en determinados estadios se producen pulsaciones; es decir, contracciones y expansiones rítmicas de la esfera gaseosa, lo que produce un refulgir intermitente de la estrella Cuando se dan estas pulsaciones, las capas exteriores de la estrella pueden ser despedidas en forma de nubes de gas.

Cuando se ha consumido toda la energía nuclear de la *gigante roja*, la esfera de gas se encoge de nuevo, por efecto de la fuerza de la gravedad, hasta quedar reducida a un tamaño muy inferior al que tenía antes de comenzar el proceso de expansión. Una estrella con la masa del Sol puede comprimirse por la presión de la gravedad hasta quedar reducida aproximadamente al tamaño de nuestro planeta. Sólo gracias a la repulsión electrostática de los núcleos atómicos de carga positiva éstos no quedan completamente «prensados». La densidad de la estrella es ahora millones de veces mayor que la del agua. Se ha convertido en una «enana blanca» que todavía brilla, aunque irá enfriándose poco a poco.

No siempre la vida de una estrella transcurre de un modo tan «apacible». Cuando las estrellas son de un tamaño algo superior al de nuestro Sol, puede llegar a producirse una tremenda explosión: puede observarse este fenómeno en el firmamento: es la aparición de una nueva y superbrillante estrella. Durante un breve período de tiempo la intensidad de su brillo será cientos de millones de veces mayor que la del Sol. El más bello ejemplo de una «supernova» de este tipo se observó en China el 4 de julio de 1054. Durante todo un año pudo observarse esta estrella incluso durante el día. Gracias a los datos registrados por los astrónomos chinos hoy somos capaces de localizar su situación en el firmamento. Podemos reconocer la denominada Nebulosa del Cangrejo, que no es sino el resto de una tremenda explosión que —como demuestra la comparación con fotografías tomadas hace cincuenta años— sigue aún en un proceso de expansión. Si a partir de la velocidad de expansión de esos residuos se calcula el momento en que tendría que haberse producido la explosión, la fecha que obtenemos es efectivamente el año 1054.

En nuestra galaxia se han descubierto hasta el presente los restos de unas 120 supernovas. Siete de sus explosiones han quedado registradas en nuestros anales históricos en los años 185, 393, 1006, 1054, 1181, 1572 y 1604; las más antiguas fueron observadas y descritas por astrónomos chinos.

Hace pocos años que se ha empezado a considerar, cada vez con mayor convicción, que la causa de esas explosiones es un «colapso gravitacional». En el caso de estrellas de gran masa, al final de su vida se produce una contracción que va más allá del estado en que quedan las denominadas enanas blancas. La presión de la gravedad ejercida sobre el centro es tan inmensa que los electrones quedan «embutidos» en el núcleo de los átomos, provocando que todos los protones se conviertan en neutrones Esto hace que desaparezca la repulsión electrostática que es consecuencia de su carga eléctrica, de manera que la estrella sufre un «colapso». Como resultado de esto la estrella adquiere súbitamente una densidad millones de veces mayor que la de las enanas blancas. El repentino recalentamiento que se produce en este proceso provoca una explosión que lanza hacia el espacio exterior hasta un 90% de la masa de la estrella en forma de nube de polvo y gas.

En el centro de la explosion queda una «masa superdensa compuesta de neutrones» («estrella de neutrones») con un diámetro de pocos kilómetros. Esta masa experimenta un movimiento de rotación sobre sí misma de hasta 100 veces por segundo, y al hacerlo emite ondas de radio. Estas estrellas de neutrones de alta velocidad de rotación son denominadas «pulsares», y todas ellas constituyen restos de supernovas. Uno de estos pulsares se encuentra ubicado en el centro de la Nebulosa del Cangrejo.

Muchos astrofísicos comparten la opinión de que además de las enanas blancas y de las estrellas de neutrones existe una tercera posibilidad —todavía muy enigmática— para el desarrollo de una estrella. Este tercer estadio es lo que los científicos denominan «agujero negro». Los agujeros negros serían en principio parecidos a la estrella de neutrones, aunque su materia sería todavía *más* densa y ejercería una fuerza de gravedad tan extrema que ninguna materia —ni siquiera la

luz o las radiaciones— podría escapar al campo de gravedad de un agujero negro. Así pues sólo pueden ser reconocidos por la fuerza de gravitación que ejercen en el espacio.

Pero sea cual fuere el destino de cada una de las grandes estrellas. en la fase final de su irradiación una parte de su masa siempre es catapultada hacia el espacio exterior Otra parte de las «cenizas» atómicas queda, al parecer, enterrada para siempre en las enanas blancas apagadas, en las estrellas de neutrones y quizá también en los agujeros negros. Parece ser que esa materia ya ha cumplido en principio su función para la evolución.

Antes de comenzar a estudiar el ciclo vital de las estrellas nos habíamos preguntado si en los orígenes del Universo la materia no existía más que en forma de partículas elementales y todos los núcleos atómicos de mayor complejidad han ido surgiendo posteriormente con el paso del tiempo, o si la diversidad de átomos que podemos apreciar hoy día ya existía desde el principio. Ahora sabemos que en todas las estrellas que vemos brillar a causa de las reacciones nucleares, los protones van convirtiéndose en núcleos atómicos cada vez más complejos. Así pues, la proporción de átomos complejos tuvo que ser necesariamente inferior hace miles de millones de años.

Esta conclusión queda corroborada por los grupos de estrellas que se hallan en las proximidades de nuestra galaxia y que, por ciertas razones astrofísicas, tienen que haberse formado —a partir de una nube de gas cósmico— mucho antes que las estrellas que se encuentran en los brazos de la espiral. Puesto que a lo largo de todos esos miles de millones de años, y a través de las explosiones de las estrellas, la proporción de átomos superiores tiene que haber ido aumentando poco a poco en las nubes de gas cósmico, las estrellas contendrán más átomos superiores cuanto más tarde se hayan formado.

En efecto, las líneas del espectro de las agrupaciones de estrellas antiguas muestran hasta 200 veces menos átomos superiores que las de las estrellas de formación más reciente, como, por ejemplo, nuestro Sol y todo nuestro sistema plane-

tario. Se labia, pues, abiertamente de estrellas de la segunda y tercera generación, haciendo referencia al hecho de que su materia formó parte anteriormente de otras estrellas. Liberada de nuevo esa materia por la explosión de supernovas, pudo ser otra vez asimilada en la formación de nuevas estrellas.

Toda la materia de nuestro planeta, compuesta casi exclusivamente por átomos superiores, proviene de antiguas estrellas que explotaron hace ya más de cinco mil millones de años. Esto significa que —aparte de los átomos de hidrógeno— *todos los átomos de los que se compone nuestro cuerpo humano* se formaron hace ya miles de millones de años en reacciones nucleares que se dieron en alguna estrella gigantesca del Universo, y que, posteriormente, han tomado parte en algún sitio en toda una serie de espectaculares procesos que dieron lugar a la formación de nuestra galaxia. Cada uno de los átomos superiores que forman parte de nosotros es el producto de un proceso evolutivo que nos vincula estrechamente a acontecimientos anteriores ocurridos en el Cosmos. Esta idea debería ser parte de la definición y comprensión de nuestra naturaleza humana.

Ya hemos visto que en las condiciones apropiadas —por ejemplo, en el interior de las estrellas— las partículas elementales tienden a combinarse espontáneamente para formar entidades de un orden superior: los núcleos atómicos de los elementos químicos. Una vez que la temperatura y la presión disminuyen —por ejemplo, tras una explosión estelar—, estos núcleos integran electrones en su sistema, de acuerdo con sus cargas eléctricas respectivas, y constituyen las unidades que denominamos átomos.

Aunque actualmente no resulta posible determinar el proceso de configuración de los 92 elementos estables que conocemos, sabemos en cambio con toda certeza que todos los átomos superiores que hemos podido encontrar en el Universo se han formado a través de diversos procesos que necesariamente implican reacciones nucleares.

Así hemos llegado al primer peldaño de la evolución: las partículas elementales se combinan entre sí para formar unidades de un orden superior: los átomos.

Vamos a denominar este fenómeno como proceso de *integración,* para poner de relieve que las nuevas estructuras son nuevas *unidades independientes* y ^dotadas de *nuevas propiedades;* propiedades que son mucho más que la mera suma de las cualidades de los elementos básicos que las componen. Este proceso evolutivo —el comienzo del desarrollo de nuestro hilo evolutivo— puede representarse mediante la siguiente anotación simbólica:

$$\int \text{Partículas elementales} \rightarrow \text{Átomo}$$

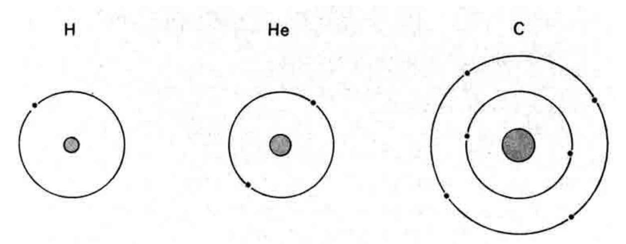
Y esto, que aparentemente es tan insignificante y que puede representarse en tan pocas palabras, es el resultado de un proceso astrofísico de gigantescas dimensiones que surge a partir de una situación inicial del Universo y cuyas últimas consecuencias se escapan al entendimiento humano. A partir de esa situación inicial se despliega un proceso de una complejidad inimaginable que es consecuencia de las maravillosas propiedades de la materia. La interacción entre las partículas elementales, determinada por la naturaleza, es lo que posibilita e impulsa la evolución. La fuerza de atracción y la tendencia a asociarse de los protones y neutrones, la fuerza de la gravedad, las fuerzas de atracción y repulsión electrostáticas, las temperaturas de «ignición» de las reacciones nucleares —que son a su vez consecuencia de la interacción entre protones y neutrones en el ámbito nuclear— y otras propiedades de la materia, del espacio y del tiempo, son las causas concomitantes que originan este proceso.

4. CATÁLISIS: LA VARITA MÁGICA DE LA QUÍMICA

«La aparente libertad de los átomos está supeditada a la armonía general de la naturaleza.»

MENDELEEV

Las nuevas unidades surgidas de la primera integración, los 92 elementos relativamente estables que conoce la química, se encuentran desplegados ante nosotros. Se diferencian entre sí por el número de protones y neutrones de sus núcleos y por el número de electrones que forman la «nube de carga» alrededor del núcleo. Según la descripción de la física —algo anticuada, aunque bastante sugerente—, los electrones recorren órbitas fijas alrededor del núcleo. En la órbita más interna sólo hay lugar para dos electrones; en la siguiente pueden situarse ocho electrones. Estas limitaciones se deben a las características de las partículas elementales. Son las consecuencias inevitables de la estructura de la materia.



Modelo de los átomos de hidrógeno, helio y carbono
Gris: núcleos atómicos; representados aquí con unas dimensiones desproporcionadas
Gris oscuro: electrones.

Con la formación de los átomos podría haberse agotado la tendencia de la naturaleza a formar estructuras complejas a partir de elementos básicos. Si hubiera sido así, nunca habrían

llegado a existir organismos vivos y menos aún seres humanos que cavilaran sobre los misterios de las combinaciones químicas.

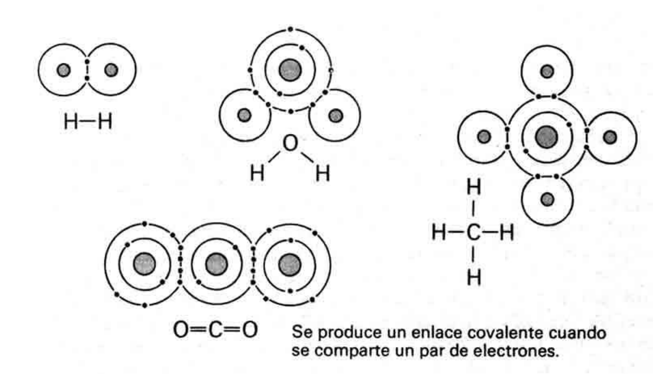
Sin embargo, los átomos tienen la propiedad de tender a formar combinaciones. Estas combinaciones de átomos reciben el nombre de «moléculas». No todos los tipos de átomos son capaces de establecer asociaciones; casi todos lo hacen, excepto los denominados «gases raros» (por ejemplo, el helio o el neón), que tienen sus orbitales de electrones completamente llenos: el helio, con dos electrones, tiene completa su «pista» interior; el neón, con diez electrones, tiene completas sus pistas interior y exterior. Por tanto, son los electrones con sus diferentes «pistas» los que desempeñan el papel principal a la hora de establecer asociaciones con otros átomos. Vamos a ver algunos ejemplos de moléculas simples.

HH	(o H_2)	simboliza una molécula compuesta por dos átomos de hidrógeno,
HOH	(o H_2O)	molécula del agua, compuesta por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno,
OCO	(o CO_2)	dióxido de carbono, y
H H C H H	(o CH_4)	metano

Las figuras esquemáticas de estas moléculas (representadas en la página siguiente) ilustran el principio básico de la asociación química que se establece entre dos átomos diferentes. Consiste básicamente en hacer que un *par* de electrones pasen a ser patrimonio *común* de ambos átomos. Mediante este «préstamo mutuo» las pistas de ambos átomos quedan ocupadas por completo, ya sea con 2 o con 8 electrones, estado que tiene preferencia y se produce espontáneamente. Los químicos denominan a este fenómeno asociación o enlace *covalente.*

De acuerdo con este principio elemental, los átomos buscan el tipo y el número de «socios». Se considera que una molécula es estable y «cerrada» cuando tras una asociación de

átomos resulta que todos tienen sus orbitales completamente ocupados. En las fórmulas que emplea la química estos pares de electrones que pertenecen a dos átomos al mismo tiempo, se representan con un guión entre las letras que simbolizan a cada átomo.



Se produce un enlace covalente cuando se comparte un par de electrones.

Ya en la nube cósmica se produce la unión entre átomos para formar moléculas. Estas moléculas pueden ser identificadas por su espectro (ondas de longitud en centímetros o de alta frecuencia) y son captadas mediante radiotelescopios. En las nubes interestelares se van detectando moléculas nuevas y cada vez más complejas. Entre ellas se hallan, por ejemplo:

El ácido cianhídrico H–C≡N, el formaldehído

$$\begin{array}{l} \mathrm{H} \diagdown \\ \quad \mathrm{C{=}O} \\ \mathrm{H} \diagup \end{array}$$

o el metilacetileno

$$\begin{array}{c} \mathrm{H} \\ | \\ \mathrm{H{-}C{-}C{\equiv}C{-}H} \\ | \\ \mathrm{H} \end{array}$$

o también las del alcohol etílico y las del éter dimetílico, ambas constituidas por nueve átomos (véase su fórmula desarrollada en las págs. 62 y 63).

En el conjunto de átomos que se concentran en los cuerpos celestes fríos (como nuestra Tierra) su tendencia a esta-

blecer asociaciones da lugar a la formación de numerosas sustancias diversas.

Al igual que el proceso de formación de los núcleos atómicos mediante la fusión de partículas elementales, también en la formación de moléculas por asociación de átomos se libera energía en forma de calor irradiado a su entorno. La cantidad de calor irradiado depende de cada molécula, pero generalmente es millones de veces menor que las cantidades liberadas en los procesos nucleares que hemos comentado en los capítulos 2 y 3. Por esto es por lo que los efectos producidos por la explosión de las bombas termonucleares son mucho mayores que los efectos de las bombas clásicas, que obtienen la energía de ciertas reacciones químicas.

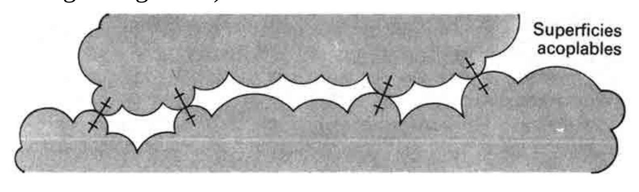
Para descomponer una molécula es necesario suministrar al menos la cantidad de energía que se desprende en su proceso de formación. Puesto que, en condiciones normales, esa concentración de energía sólo se encuentra raramente en la superficie de la Tierra, las moléculas son en principio entidades estables. Incluso en una mezcla de gas explosivo compuesto por hidrógeno y oxígeno no ocurre nada a temperaturas normales, puesto que las moléculas de H_2 y O_2 son asociaciones saturadas. Pero una sola chispa provocaría la explosión de esa mezcla, pues su elevada temperatura desharía la asociación existente entre las moléculas. La explosión haría además que cada dos átomos de hidrógeno se combinaran con un átomo de oxígeno, formando moléculas de agua. Y, dado que en este proceso se libera más energía que la que era necesaria para la desintegración de las moléculas de gas originales, se produce un calor adicional que contribuye a la desintegración de más moléculas de H_2 y de O_2, permitiendo que reaccionen y se conviertan en agua. Así pues, el proceso se fomenta a sí mismo, y todo el gas existente queda convertido en agua (explosión de gas fulminante).

Por cada reacción química, es decir, por cada formación de moléculas a partir de otras preexistentes, es necesario que se produzca primero la desintegración de las moléculas originales. Sólo así estarán los componentes en condiciones de

asociarse —por lo general implicando el desprendimiento de energía en forma de calor— y formar otras unidades estables.

La capacidad de asociación de los átomos no sería suficiente en sí para dar lugar, por reacciones químicas, a moléculas complejas realmente grandes. El límite está determinado por la siguiente dificultad: para que las moléculas puedan reaccionar libremente es necesario que primero se desintegren otras asociaciones estables mediante la aportación de calor. Sin embargo, cuando suministramos calor a una molécula eso hace que se deshagan *todas* las asociaciones qué contiene la molécula. Cuanto mayor sea esta molécula, más posibilidades hay de que se deshaga *alguno* de sus vínculos más débiles y de que, en vez de hacerse cada vez más grande, vaya desintegrándose. Debido a esto, las moléculas, en principio, no podrían superar la asociación de determinado número de átomos[2]. No obstante, la naturaleza ha encontrado el modo de superar estos impedimentos. El mecanismo que emplea para ello se denomina «catálisis».

Aparte de los enlaces químicos propiamente dichos que se establecen por compartimiento de electrones entre varios átomos, existen también otros enlaces más débiles conocidos como «enlaces de adición». Podemos pasar por alto aquí los complicados detalles del proceso de formación de estos enlaces de adición. Para nuestro estudio del fenómeno de la catálisis lo importante es que estos enlaces de adición puedan establecerse cuando existe una concordancia espacial entre dos superficies moleculares (zonas marcadas en gris oscuro en la figura siguiente).



[2] Habitualmente los cristales son considerados también como moléculas gigantes. No nos detendremos aquí a considerar el motivo, puesto que analizaremos este fenómeno en el capítulo próximo.

Pero los enlaces de adición son demasiado débiles para poder mantener unidas de forma duradera incluso a dos moléculas pequeñas. Sólo en el caso de las grandes moléculas (moléculas biológicas) —a cuyo grado de complejidad todavía no hemos llegado en nuestro estudio— los enlaces de adición resultan estables, porque la suma de muchos enlaces débiles puede asegurar una adherencia permanente.

Sin embargo, las moléculas pequeñas pueden —ya sea en forma gaseosa o disueltas en agua— acoplarse *provisionalmente* a superficies concordantes. Cuando la concordancia es buena, pero no perfecta, las moléculas, o partes de ellas, experimentan cierta distorsión. Esta distorsión permite que los enlaces (pares de electrones) afectados puedan «abrirse» con más facilidad para unirse a otras moléculas y formar nuevos compuestos químicos. Esto hace posible que se produzcan reacciones químicas a bajas temperaturas (sin poner en peligro la estructura total de la molécula) que de otro modo no hubieran sido factibles. La superficie «catalizadora», que en sí no participa en la reacción, posibilita mediante la distorsión de las moléculas lo que en principio parecía ser imposible.

Por ejemplo, el platino pulverizado hace que se produzca la explosión del gas fulminante incluso a temperatura ambiente. El platino «cataliza» la reacción. Los semiconductores o las sustancias aislantes pueden ser utilizados como catalizadores en determinadas reacciones químicas, aunque no en todas. Hay moléculas que sólo sufren una distorsión que permite la reacción química cuando entran en contacto con determinadas superficies moleculares. De esta forma incluso moléculas muy grandes pueden quedar unidas sin correr el riesgo de desintegrarse. Sin el fenómeno de la catálisis (que se supone responsable de la formación de moléculas interestelares), la abundancia y el tamaño de los complejos moleculares hubieran sido bastante modestos.

Posteriormente, en el proceso de evolución biológica, la naturaleza ha desarrollado hasta la perfección el fenómeno de la catálisis. Puesto que para ciertas reacciones químicas de determinadas moléculas son necesarias superficies muy específicas —es decir, superficies con una concordancia espe-

cial—, los organismos han desarrollado un mecanismo bastante complejo (véase cap. 7) para reproducir sistemáticamente dichas superficies. Desde el punto de vista *químico* es aquí donde se encuentra la clave de la vida.

De hecho, en las células de todos los organismos se producen determinadas moléculas gigantes, los denominados «enzimas». Existen miles de tipos diferentes de enzimas. Cada tipo presenta una superficie particular que sólo «encaja» con algunas moléculas, haciendo el papel de catalizador en *un* tipo determinado de reacción química. Así pues, cada enzima tiene la misión de ayudar a determinadas moléculas a reaccionar químicamente a bajas temperaturas, lo que de otro modo no sería posible.

Sin embargo, incluso sin enzimas, en la fase material de la evolución se desarrolló directamente toda una serie de diferentes moléculas grandes a partir de otras más simples. Estas reacciones son posibles mediante catalizadores como la tierra arcillosa, la lava porosa o las superficies de piedras y metales. Especialmente polifacéticas son las combinaciones en las que participan átomos de carbono. Sus asociados más frecuentes son el oxígeno, el hidrógeno y el nitrógeno. De los miles de moléculas de formación prebiológica presentamos únicamente estos dos ejemplos:

Dos de las numerosas moléculas formadas durante la evolución prebiológica

Ya hemos avanzado un poco en el estudio de la estructuración de la naturaleza. Los átomos, *productos* resultantes de la primera integración, se han convertido a su vez en elementos básicos. Con ellos se constituyen nuevas formas de mayor

complejidad. De los 92 tipos de átomos originales se han desarrollado miles de tipos de moléculas.

Todas esas moléculas han adquirido nuevas propiedades debidas a su combinación; propiedades que no podrían ser atribuidas a los átomos individuales que las componen. Si se desintegra una de esas moléculas desaparecen también sus propiedades. Las moléculas son, por tanto, *nuevos entes de un nivel superior.* Podemos denominar a este fenómeno «proceso de segunda integración» y representarlo simbólicamente en nuestro hilo rojo evolutivo como una prolongación:

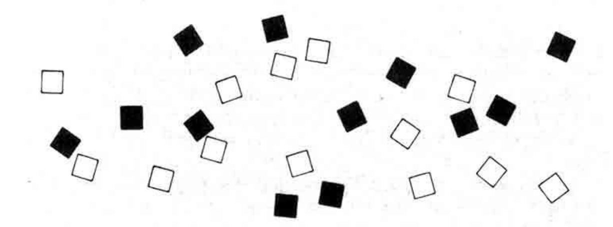
$$\int \text{Partículas elementales} \rightarrow \text{Átomos} \rightarrow \text{molécula}$$

¿De dónde se derivan las propiedades de las moléculas? ¿A qué se deben? Sólo podrían explicarse a partir de las propiedades de los átomos, pero ¿de dónde se derivan éstas? Sólo a partir de las propiedades de las partículas elementales podríamos explicar las propiedades de los átomos. Las propiedades de las partículas elementales determinan las propiedades de los átomos, y éstas, a su vez, las de las moléculas. Puede decirse, por tanto, que *todas las propiedades de las moléculas tienen su origen en sus partículas elementales.*

5. ELEMENTOS BÁSICOS Y ESTRUCTURAS

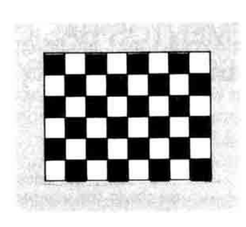
> «Y podemos considerar todo el Universo como un objeto con una configuración determinada.»
>
> ERASMUS DARWIN

Si le damos a un niño un montón de cubos de madera, lo primero que hará será desparramarlos por el suelo:



El orden en que queden al caer será un tanto «caótico» y el lugar que ocupe cada cubo será completamente fortuito y no guardará ninguna relación con el resto del grupo. Las distribuciones caóticas se caracterizan por el hecho de que nadie podría afirmar que este o aquel componente se encuentra en un lugar que no le corresponde. En una distribución de este tipo no existen «errores», puesto que no existe ninguna limitación.

Esto podría preocupar a un niño ordenado, que cogería los cubos y los colocaría en una caja; tal vez incluso siguiendo el modelo de un tablero de ajedrez.



Ahora sí existe un «orden». Un orden que se caracteriza por la regularidad. Se ha establecido un principio por el cual se pueden completar los espacios que queden libres o reconocer los errores cometidos en la colocación. Este principio no nos permite una colocación al azar. Quizá después el niño comience a construir figuras con los cubos.

Al contrario que en la distribución caótica o regular, estas figuras se caracterizan por el hecho de que los cubos no están colocados al azar ni con un orden determinado por un patrón. Sin embargo, guardan cierta relación entre sí. Vamos a considerar esta cuestión con mayor detenimiento, puesto que el concepto de «estructura» desempeña un papel importantísimo en este libro.

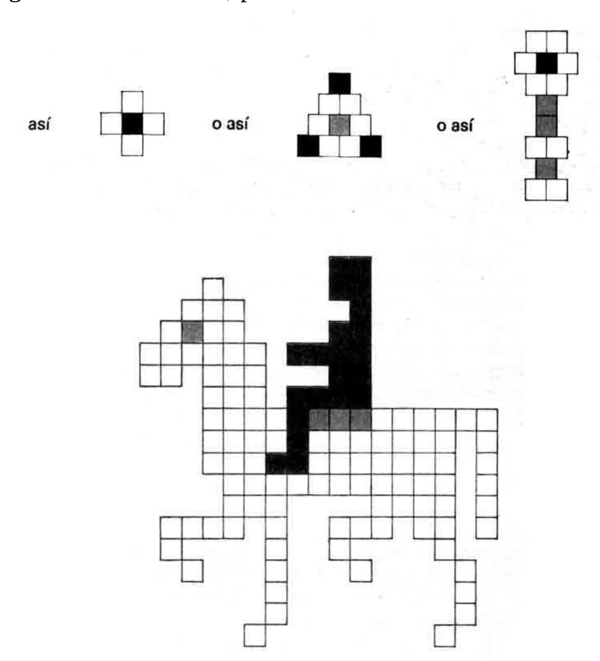
Lo típico de una estructura es que sus elementos básicos tienen que estar determinados y dependen de un espacio concreto. En comparación con una disposición caótica, las posibilidades son limitadas, aunque, en comparación con un orden determinado por un patrón, permiten ciertas libertades.

Las estructuras sólo pueden ser comprendidas según van surgiendo y están determinadas por toda una cadena de coincidencias en las que *los resultados de coincidencias anteriores influyen sobre las probabilidades de posteriores coincidencias*. Veamos algunos ejemplos que nos ayuden a comprender esto mejor.

Cuando en un bosque crecen nuevos árboles, su situación será fortuita, pero no del todo, puesto que estará condicionada por la de los árboles ya existentes. Los castaños, por ejemplo, sólo podrán crecer en las proximidades de otro castaño; por otra parte, las semillas que caigan justo al lado de un árbol ya desarrollado apenas tendrán posibilidades de sobrevivir. El orden de distribución de los árboles en un bosque es una estructura.

De un modo similar se distribuyen los bañistas en una playa. En principio es fortuito el lugar en que cada uno de ellos decide tenderse, al menos inicialmente. Sin embargo, pronto las familias con niños empezarán a preferir la zona en donde haya más niños; los jóvenes preferirán estar cerca de chicas atractivas, y los más viejos tratarán de evitar la proxi-

midad de los que estén jugando a la pelota. El sitio elegido seguirá siendo fortuito, pero no totalmente.



Un último ejemplo: la distribución de las habitaciones de una casa goza, en principio, de mucha libertad de elecció7n. Sin embargo, existen ciertas limitaciones marcadas en parte por razones técnicas y en parte por consideraciones de tipo práctico. Por ejemplo, las habitaciones dotadas de cañerías de agua deberían estar contiguas o superpuestas; el comedor, próximo a la cocina y, además, cerca de la entrada, etc. Así, cuando un arquitecto hace los planos, este tipo de consideraciones afectará a todas las demás decisiones.

Generalicemos estas consideraciones imaginando cualquier distribución de módulos que permita ciertas alteraciones o que pueda ser ampliada mediante módulos complementarios. Cuando existe un margen de libertad —es decir, distintas posibilidades— para alterar o complementar la distribución,

cuando la distribución establecida influye directamente sobre el futuro desarrollo, ampliando, restringiendo o incluso eliminando futuras posibilidades de desarrollo o cambio, *entonces* se trata de una estructura.

Una estructura es el resultado de un proceso en cadena en el que la muestra ya establecida determina el grado de probabilidad de que en el futuro se produzcan otras alternativas. Podemos decir, por tanto, que las estructuras se desarrollan y se alteran sólo a través de casualidades encadenadas.

LAS ESTRUCTURAS SON DISTRIBUCIONES DE COMPONENTES QUE SE DESARROLLAN CON UNA LIBERTAD AUTORRESTRINGIDA.

Según esta definición, una estructura sólo puede sufrir dos tipos de «degeneraciones», que, como casos límite, no deberían ser consideradas estructuras propiamente dichas. La primera degeneración consistiría en la desaparición de la autorrestricción, de modo que lo existente no ejercería *ninguna* influencia sobre lo futuro. La otra degeneración consistiría en la desaparición de la libertad de acción: lo existente determinaría por completo lo futuro, de modo que el desarrollo se daría sólo en una forma determinada y quedaría excluido el azar.

La primera degeneración conduce a distribuciones caóticas. Éstas surgen cuando no existe ningún tipo de relación entre los «módulos». Por ejemplo, si tiramos un dado varias veces consecutivas y apuntamos los resultados:

4 6 3 3 2 5 4 3 6 5 1 3 2 4 4 1 ...

la serie de números que obtenemos es caótica, puesto que en cada tirada se dan las mismas circunstancias y el resultado de cada una de ellas es independiente de los resultados obtenidos en tiradas anteriores y se deben «puramente» al azar.

La segunda degeneración conduce a una distribución regular que obedecerá a un principio previamente establecido. Una distribución de este tipo no puede obtenerse echando los

dados. Por el contrario, el concepto de «orden» significa que a cada cosa le corresponde un lugar; es decir, que existe un principio que la rige y queda excluido el azar. El comienzo determina todo lo que sigue después. Por ejemplo:



La regularidad reside aquí en la periodicidad. O:



Aquí la regla que determina el orden es: «números primos en gris oscuro».

Quien haya reconocido esta ley podrá seguir ampliando el modelo hasta el infinito. Cada uno de los componentes está en estrecha relación con todos los demás; entre todos ellos determinan cómo debe continuarse. No hay espacio para el azar; no hay libertad de acción.

La estructura está por tanto entre los dos extremos: el caos y el orden. En el caos no existe ninguna limitación; en el orden ninguna libertad de acción. Las estructuras contienen relaciones internas, autorrestricciones y, al mismo tiempo, libertad para que el azar desempeñe un papel en el futuro desarrollo. En la naturaleza todo lo material se desarrolla dentro de esa mezcla de autorrestricción y libertad.

Hasta ahora todas las estructuras que hemos considerado estaban formadas por cubos de madera u otros módulos materiales. Pero esto no es una característica de las estructuras. También es una estructura el ejemplo de la página siguiente.

O las letras que componen una frase, por ejemplo:

«AÚN SABEMOS MUY POCO ACERCA DE LAS LEYES DEL UNIVERSO.»

En ella encontramos una gran diversidad de interrelaciones y dependencias internas, que son, precisamente, las que dan sentido a la frase. Las frases del lenguaje humano son también estructuras.

Las estructuras, las figuras o la escritura se caracterizan por la armonía que guardan sus elementos constituyentes dentro de un entorno, lo que les da carácter de unidad.

Por tanto, en cada frase existen una serie de limitaciones: una vez ha quedado determinado el comienzo de la frase no podemos continuarla al azar; por otra parte, tampoco está determinado estrictamente cómo habría que continuar. Existe cierta libertad de acción.

Un comienzo podría ser, por ejemplo:

ERA UN DÍA...

El comienzo de la frase (estructura) permite diferentes, aunque no infinitos, modos de continuar.

ERA UN DÍA MAGNÍFICO.

ERA UN DIAMANTE DE GRAN PUREZA.

Si ampliamos el comienzo de la frase, por ejemplo:

ERA UN BONITO DÍA...

vemos que la ampliación de la estructura nos impone mayores restricciones sobre la continuación de la frase. Algunas continuaciones que antes eran posibles ya no están permitidas; aun así, las posibilidades son numerosas:

ERA UN BONITO DIAPASÓN DE SONIDO AGUDO

El concepto de estructura va unido a una peculiar vaguedad. Tomemos por ejemplo esta combinación de letras:

ZNAM

¿Es una estructura? Quien no sepa que se trata de una palabra del idioma serbio, puede tomarla en principio por un producto del azar. Si sólo disponemos de *una* estructura, y además de una estructura pequeña, no podemos saber si se trata efectivamente de una estructura. Además, por estar formada por pocos componentes, no podemos descubrir si existe algún principio oculto de estructuración. Por esto la escritura en clave sólo puede ser descifrada si disponemos de un fragmento suficientemente largo; de otro modo no es posible

descubrir si las relaciones internas que aparecen en tal escritura se deben a un orden determinado o a la casualidad.



(De la edición Eulenburg, n.° 955)

Esto nos conduce a otra cuestión; a considerar la relación existente entre los conceptos *estructura* e *información.* (Utilizamos el término «información» en el sentido de «noticia» y no como concepto derivado de la teoría de la probabilidad.)

Toda transmisión de información (p. ej., las frases del lenguaje) y todo registro o almacenamiento de información (p. ej., un libro) se construyen mediante estructuras. *Donde no* hay *estructuras, no existe información.* Si enviáramos al espacio «estructuras» en forma de radioondas y fueran captadas por seres inteligentes de otro planeta, les sería posible darse cuenta de que existía una relación y dependencia entre la disposición y la clase de las señales emitidas y de que, por tanto, no se trataba de una disposición caótica. Con toda seguridad interpretarían esas estructuras como algún tipo de noticia o comunicado.

¿Significa esto que todas las estructuras contienen información? Antes de contestar afirmativamente vamos a definir primero el concepto de «información» en su sentido más amplio. La existencia de información es independiente de que haya alguien que «entienda» el mensaje que se trata de comunicar. Una antigua inscripción en un lenguaje extraño contiene información a pesar de que no exista ningún ser viviente que sea capaz de entenderla. Siempre podrá darse el caso de que, hoy o mañana, algún científico consiga descifrarla.

Si utilizamos la palabra «información» en su sentido más limitado, en su sentido original, es decir, en el sentido de «noticia», comprenderemos que es necesario que exista alguien que quiera comunicar esa noticia. Pero esta necesidad también desaparece si atribuimos a toda estructura un contenido de información en su sentido más amplio. Lo esencial es que de una estructura pueden derivarse ciertas consecuencias estrechamente vinculadas a ella. Que esas consecuencias surtan efecto o no, dependerá del entorno en que se halle la estructura. Dependerá, en principio, de las otras estructuras con que entre en contacto y establezca una interrelación. Por ejemplo, de si hay un ser humano capaz de comprender la lengua en que está escrita la antigua inscripción. Las consecuencias o efectos serán específicos para cada estructura. Pero una misma estructura en interrelación con varias estructuras diferentes tendrá necesariamente efectos diferentes. Por ejemplo, el comunicado «El equipo C gana al equipo A»

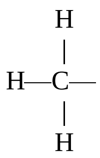
puede suscitar alegría o decepción, según sea escuchado por los seguidores de uno u otro equipo.

También las estructuras que no son obra del entendimiento humano, y que han surgido de la naturaleza como producto de la evolución, *poseen la capacidad de producir efectos específicos*, y eso es *información.* Muy pronto estudiaremos más detalladamente un grupo especial de estructuras cuyos efectos específicos son producir innumerables copias de sí mismas. Todas esas estructuras contienen un tipo determinado de información.

La formación de estructuras es el principal fenómeno de toda evolución. Cuando en el proceso de primera integración las partículas elementales se combinan para formar átomos, esto supone el comienzo de estructuras que estarán en constante crecimiento. Sus componentes se combinan por casualidad, pero no al azar; no son posibles todas las combinaciones imaginables. Entre estos elementos básicos existen relaciones que no permiten ciertas «continuaciones» ni la formación de determinadas estructuras.

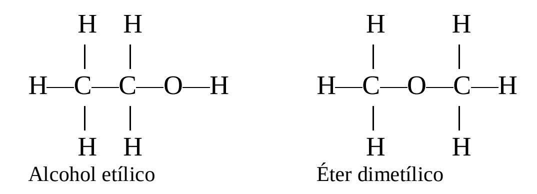
Por ejemplo, un átomo con cuatro protones es tan poco estable como un núcleo de helio con tres electrones en su órbita. Sin embargo, existen ciertas libertades. Una asociación de tres partículas *a* (núcleo de carbono) puede ampliarse, por ejemplo, mediante la absorción de un protón o de una partícula a.

De igual modo, la formación de moléculas está sometida a limitaciones determinadas por la envoltura electrónica de los átomos. Por ejemplo, en una estructura del tipo



puede añadírsele a la derecha un H, un OH u otras muchas estructuras parciales. Pero de ningún modo cualquier átomo. Los átomos y las moléculas son, por tanto, configuraciones básicas con libertades autorrestringidas; es decir, estructuras.

Hay moléculas que se componen de los mismos átomos que otras moléculas; la diferencia está en la estructuración de esos átomos. Por ejemplo, el alcohol etílico y el éter dimetílico tienen la misma composición básica, a saber: C_2H_6O; pero sus fórmulas estructurales son diferentes:



Alcohol etílico Éter dimetílico

Una disposición diferente de los átomos en diferentes estructuras implica diferentes propiedades: diferentes efectos de esas moléculas. El tipo de componentes básicos y su lugar de emplazamiento determinan las propiedades de las estructuras.

Un caso especial muy interesante nos lo proporciona la diferencia entre la simetría izquierda y derecha. En este caso nos encontramos con dos tipos de moléculas con estructuras-reflejo; como si se tratara de la mano izquierda y la derecha. Aunque las giremos y las situemos como queramos, siempre podremos diferenciar la mano izquierda de la derecha en nuestro espacio tridimensional. Está claro que todas las estructuras de la naturaleza son estructuras *espaciales*, que sólo pueden representarse imperfectamente sobre la superficie de un papel.

La química es la ciencia que describe las posibilidades de las estructuras moleculares y las aplica en la práctica. A la configuración de las moléculas, es decir, a la estructura de sus átomos, se debe también el efecto catalítico que ejercen las superficies moleculares. *Las estructuras influyen directamente en la formación de nuevas estructuras.* Esta potencial influencia, que va ampliándose constantemente, va a acompañamos a lo largo de todo este libro.

La ampliación gradual de las estructuras a través de los procesos de integración se produce muy lentamente. Sin embargo, la tendencia a la asociación es tan fuerte que, por de-

cirlo de un modo comprensible para nuestra mentalidad humana, los átomos y las moléculas están «impacientes» por asociarse e intentan tomar un atajo en su largo camino hacia la constitución de estructuras: formando cristales, es decir, organizándose en estructuras regulares compuestas por módulos uniformes. Todo grano de arena, toda roca, están compuestos por esos cristales. La estructura gigantesca de un cristal implica fuertes restricciones; exige un orden casi perfecto. Los cristales son estructuras «casi degeneradas».

Debido a ello, no nos detendremos a considerar detalladamente la formación de cristales, una rama secundaria en el proceso de crecimiento de las estructuras. A pesar de lo beneficioso y necesario que pueda ser para el proceso general de la evolución, esta rama no conduce a formas y estructuras superiores. Como podremos ver más adelante, el principio básico de toda evolución reside en la configuración de nuevas estructuras con un grado mayor de complejidad: labor que sólo puede realizarse paso a paso a lo largo de un arduo camino. Se trata, evidentemente, de conseguir la máxima complejidad y efectividad con los mínimos elementos.

Los dos procesos de integración que hemos considerado hasta ahora se basan en el mismo fenómeno fundamental: la configuración de estructuras a partir de una limitada variedad de elementos básicos. El desarrollo estructural constituye la ley fundamental de toda materia. Vamos a ver ahora cómo prosigue este desarrollo.

6. LA ESCRITURA DE LAS MOLÉCULAS

«El principio de la vida será reconocido algún día como parte o consecuencia de una ley general.»

CHARLES DARWIN

Hasta ahora hemos considerado que, en la naturaleza, el desarrollo de estructuras se basa en procesos de integración escalonados y continuos. Así, las nuevas unidades, producto de una integración, pasan a ser los elementos básicos de la siguiente fase o integración. Por tanto, la estructura final de la molécula no se produce por la suma de partículas elementales, sino que es necesaria la asociación de elementos «prefabricados», es decir, de átomos.

Si este principio del desarrollo jerárquico de las estructuras siguiera siendo válido, las moléculas grandes no podrían producirse por una continuada asimilación de átomos individuales, sino que deberían utilizar las moléculas más pequeñas como elementos básicos para la configuración de unidades más complejas.

Esto es precisamente lo que podemos observar en la naturaleza. Puede demostrarse matemáticamente que una formación jerárquica es el camino más rápido para la consecución de una complejidad estructural. Entre millares de moléculas diferentes hay algunos tipos que pueden asociarse formando largas *cadenas.* Estas cadenas son los elementos básicos para la próxima integración. Vamos a considerar ahora la diversidad de este tipo de cadenas moleculares, aunque para ello perdamos momentáneamente el hilo rojo evolutivo que estábamos siguiendo (que habíamos dejado en la pág. 53) para volver a retomarlo de nuevo en la pág. 87.

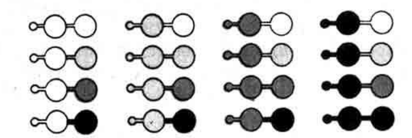
El mejor modo de comprender las cadenas moleculares es compararlas con un collar de cuentas de diferentes colores. Imaginemos que hay cuentas de cuatro colores distintos.

¿Cuántas cadenas distintas podemos formar con ellas? ¿Cuántos grupos distintos de tres cuentas podríamos formar?

Para la primera cuenta de la cadena habría naturalmente cuatro posibilidades:



Como segunda cuenta podríamos añadir a cada una de esas cuatro cualquiera de las otras cuatro:



En total obtenemos $4 \times 4 = 4^2 = 16$ diferentes configuraciones de dos perlas. A cada uno de estos 16 pares podremos añadirle una tercera cuenta, con lo que obtendremos $16 \times 4 = 4^3 = 64$ diferentes grupos de tres cuentas.

Si prolongamos la cadena, cada nuevo eslabón que añadamos multiplicará por cuatro las posibilidades. Como diría un matemático, al ir prolongando la cadena, la diversidad aumenta de forma «exponencial». En una cadena de diez cuentas habría, por tanto

$$4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 = 4^{10} = 1.048.576$$

y en una de veinte cuentas: 4^{20} = 1.099.511.627.776 diferentes posibilidades. En una cadena de 100 cuentas llegaríamos a tener 4^{100} es decir

1.600.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 = $1{,}6 \times 10^{60}$

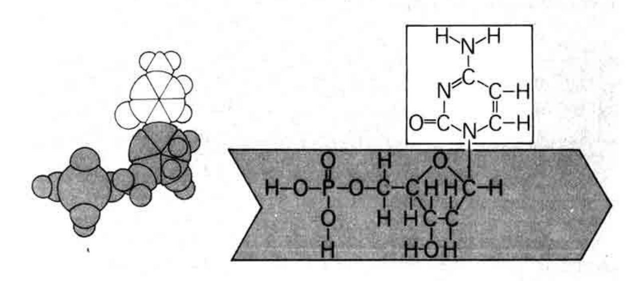
diferentes secuencias de colores. Si toda la humanidad se dedicara durante milenios a formar cadenas de 100 eslabones con cuentas de cuatro colores elegidas al azar, es perfectamente posible que no se hicieran dos cadenas con la misma secuencia de colores. El número de posibilidades es prácticamente inimaginable; y eso, con cadenas de sólo cien cuentas y únicamente cuatro colores.

Los químicos denominan a este tipo de cadenas moleculares «polímeros». En la naturaleza encontramos dos grupos de

polímeros con una importancia fundamental para la evolución: los ácidos nucleicos y las proteínas.

ÁCIDOS NUCLEICOS

Al igual que en el modelo del collar de cuentas, los denominados nucleótidos se componen también de cuatro elementos básicos diferentes. Sólo para dar una idea del tamaño y grado de complejidad de estos elementos básicos queremos presentar aquí uno de ellos con su fórmula química y en su forma «real», compuestos por «bolas de átomos». Los otros tres nucleótidos son muy parecidos.



La parte inferior de la molécula (gris) es igual en los cuatro tipos de nucleótidos, lo que representamos aquí esquemáticamente como: Las partes superiores de la molécula (en color claro) son diferentes. Podemos representar este hecho de la siguiente forma:

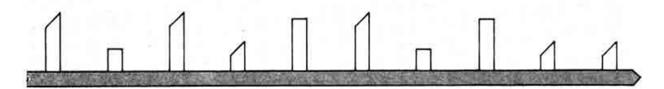


Las partes inferiores son las que se encargan de vincular los eslabones de la cadena:



Estos eslabones son covalentes, es decir, que los átomos están unidos por pares de electrones compartidos.

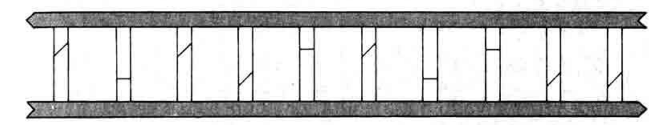
Por sus diferencias, las partes superiores de los eslabones dan lugar a la gran diversidad de cadenas moleculares existentes:



Existen dos tipos de ácidos nucleicos que presentan ligeras diferencias (entre otras, en la parte molecular que forma el eje de la cadena). Uno de ellos es el ácido desoxirribonucleico, representado por las siglas ADN. El ADN es *el portador de la información hereditaria de todos los seres vivos.*

El descubrimiento de que el orden de los nucleótidos en el ADN no es caótico (es decir, fortuito) ni periódico (es decir, siguiendo una ley determinada) fue un gran paso hacia una comprensión mucho más profunda de la vida. Este orden es más bien una estructura que presenta dependencias internas e interrelaciones entre sus componentes. El ADN de los seres vivos puede ser comparado —y no sólo superficialmente— a un sistema de *escritura.* La información hereditaria de todos los organismos se halla contenida en unas cadenas de moléculas que se asemejan a un sistema de escritura.

En el próximo capítulo volveremos a ocuparnos del significado del ADN. Lo que nos interesa antes que nada es la capacidad de estas cadenas de ADN de asociarse y formar cadenas dobles:

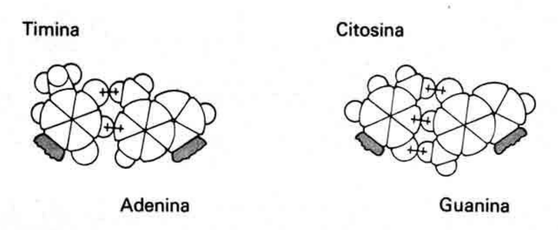


Las partes diferentes (claras) de los cuatro elementos básicos (llamados adenina, timina, guanina y citosina) tienen una configuración que hace posible que cada dos de ellas formen un par, a modo de peldaños de una «escalera molecular». Los enlaces químicos entre las dos mitades de cada peldaño son enlaces de adición débiles. Sin embargo, la gran cantidad que

existe proporciona una fuerte adherencia a la cadena doble de moléculas, siempre que sea suficientemente larga.

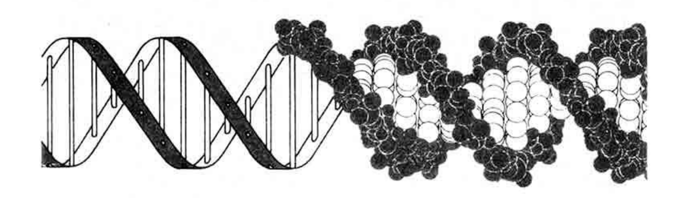
Naturalmente, para que llegue a formarse una estructura doble (una «escalera») es necesario que las secuencias de los elementos básicos de las dos cadenas individuales se correspondan *exactamente*. Esta correspondencia sólo estará garantizada cuando el elemento básico adenina encuentre enfrente a la timina, y la guanina a la citosina. Los químicos hablan, pues, del «apareamiento» de los nucleótidos. La timina se aparea siempre con la adenina, y la citosina con la guanina.

Los peldaños de nuestra escalera tienen en realidad un aspecto como el que se representa en la siguiente figura. En ella las partes grises representan los puntos de unión con los «largueros» de la escalera. Los átomos resaltados en gris oscuro determinan la adaptación (enlace de adición) entre los correspondientes nucleótidos:



Sin embargo, estos componentes básicos tienen unas dimensiones que no permiten que la escalera sea plana como la habíamos representado hasta ahora. La figura siguiente nos muestra esquemáticamente un fragmento de una de estas escaleras con forma de «doble hélice» y, para hacemos una idea más realista de esta «doble hélice» del ADN, la continuamos con otro tramo en el que se representan los átomos individuales (en el que los pares de nucleótidos son perpendiculares al plano de la imagen en cada una de las vueltas de la escalera).

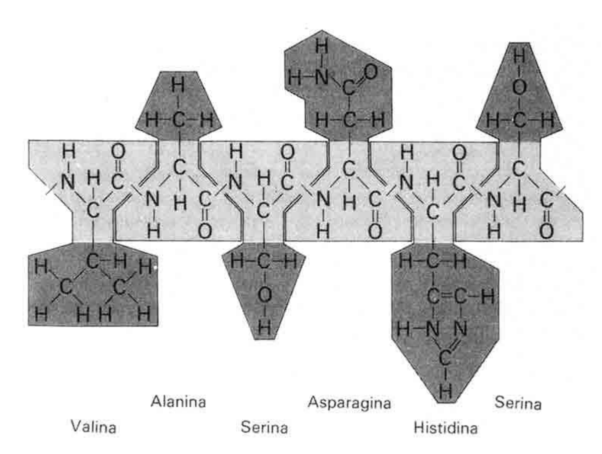
¿Quién hubiera podido pensar que los protones, neutrones y electrones serían capaces de unirse para formar estructuras espaciales tan complejas?



El segundo tipo de ácido nucleico, los ácidos ribonucleicos, representados por las siglas ARN, tienen unas funciones diferentes de asistencia dentro de las células vivas (véase capítulo 7). También el ARN se compone de cuatro nucleótidos que se asocian para formar un tipo de cadena algo diferente de las del ADN.

Aunque por su estructura el ARN puede también formar cadenas dobles, generalmente se encuentra en forma de cadena simple, y en estrecha relación con determinadas proteínas. Las proteínas son el segundo grupo importante de cadenas moleculares, en el que centraremos ahora nuestra atención.

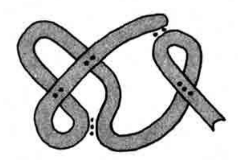
LAS PROTEÍNAS

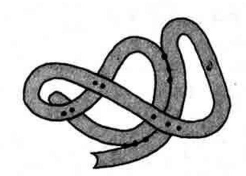


Están compuestas también por elementos básicos que podríamos clasificar en dos grupos: el primero (gris) es siempre

el mismo y establece enlaces químicos fuertes, constituyendo el eje de la cadena; el segundo (gris oscuro) es el responsable de la diversidad de los elementos básicos. Las proteínas presentan 20 diferentes tipos de componentes moleculares básicos, llamados aminoácidos. Como ejemplo, hemos representado en el gráfico anterior un fragmento de una cadena compuesta por seis componentes básicos.

Al contrario que el ADN, que presenta siempre la misma forma de escalera helicoidal (puesto que la secuencia de pares de elementos básicos siempre adopta la forma de doble hélice), las cadenas de proteínas se retuercen y pliegan formando complejos «ovillos», cuyas vueltas permanecen unidas mediante innumerables enlaces de adición. Dos dibujos esquemáticos pueden servir para mostramos estos pliegues:





La forma de los pliegues no es, sin embargo, producto del azar, sino que está determinada por la secuencia de los componentes, es decir, por la «escritura» de los aminoácidos en la cadena. Esto hace que las cadenas de proteínas con idéntica secuencia presenten exactamente los mismos pliegues.

El esquema que presentamos a continuación trata de hacer comprensible la razón de que una secuencia determinada de elementos básicos dé lugar necesariamente a una misma formación de pliegues. En la realidad este fenómeno es naturalmente mucho más complicado que el modelo que aquí presentamos.

LOS PLIEGUES
DE UNA CADENA PROTEICA
SE RIGEN POR LA INFORMACION CODIFICADA
EN LA SECUENCIA
DE SUS ELEMENTOS BASICOS

Puesto que secuencias diferentes tienen como consecuencia pliegues diferentes, la variedad de formaciones u ovillos es también prácticamente infinita. En la pág. 66 calculamos que una cadena de ADN de 100 componentes básicos puede tener $4^{100} = 1{,}6\times10^{60}$ secuencias posibles. Puesto que las cadenas proteicas disponen de 20 elementos básicos en vez de aquellos 4 nucleótidos, las posibilidades que existen para una cadena de 100 eslabones son mucho mayores:

$$20 \times 20 \times 20 \times 20 \ldots = 20^{100} \approx 1{,}3\times10^{130},$$

Es decir, una cifra mayor que la que supondría un 1 seguido de 130 ceros. (Según los cálculos realizados por los físicos, la cifra total de partículas elementales que componen la materia existente en el Universo es del orden de 10^{80}). El número de posibles estructuras proteicas es inimaginablemente mayor.

Las cadenas moleculares del ADN y de las proteínas han ampliado enormemente la cantidad de estructuras que podíamos encontrar en la naturaleza. Cuando llegan a unirse 100 aminoácidos, la estructura a que dan lugar es 100 veces mayor que la de los aminoácidos individuales Pero en este mismo pro ceso de combinación, la diversidad de estructuras ha aumentado hasta alcanzar cifras inimaginables para nuestro intelecto.

Si pudiéramos coger toda la materia existente en el Universo conocido y formáramos con ella todas las cadenas proteicas de 100 eslabones que pudiéramos, nos daríamos cuenta de que toda esa materia no nos permitiría llegar a producir más que una parte ínfima de todas las secuencias posibles en potencia. Podemos deducir, por tanto, que en todo el Universo conocido no podríamos encontrar más que un número muy reducido de todas las posibilidades teóricas. A partir del umbral que constituyen los polímeros, la naturaleza ya no puede consumir la gran diversidad de estructuras que puede llegar a formar.

La evolución de la materia que hemos descrito en estos úl timos capítulos nos ha llevado paso a paso desde una situa-

ción inicial completamente simple hasta la formación de una enorme diversidad de pequeñas estructuras. Las múltiples integraciones necesarias para que se haya producido ese desarrollo son una manifestación del proceso automático de organización de la materia. La *posibilidad* de llegar a tal diversidad de estructuras y la diversidad de propiedades de las moléculas, pequeñas o grandes, radican en las propiedades de esas partículas elementales en apariencia tan simples.

Esto no quiere decir que todas las propiedades biológicas de la materia puedan deducirse de sus propiedades químicas, ni éstas de sus propiedades físicas observables. En cada fase de integración los nuevos entes presentan nuevas propiedades que no pueden explicarse por la suma de propiedades de sus componentes, sino sólo como consecuencia de la *estructura* a que a unión de estas partes ha dado lugar.

Sin embargo, el potencial de integración para llegar a formar nuevas unidades con sus correspondientes características es intrínseco a la naturaleza de esas partículas elementales Y es esa propiedad intrínseca la que permite que, a través de diferentes procesos de integración, lleguen a crearse estructuras que, a su vez, mediante nuevos procesos de integración, dan lugar a nuevas unidades estructurales dotadas de nuevas propiedades, y así *ad infinitum.*

Los elementos básicos de la materia son creaciones maravillosas.

EVOLUCIÓN DE LA VIDA

7. EL CICLO FUNCIONAL DE LA CÉLULA

«La vida es objeto y sujeto activo de su propia evolución.»

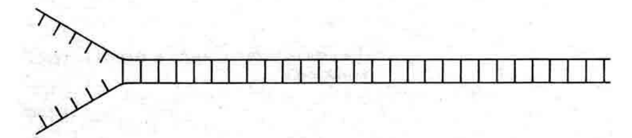
HEGEL

Habíamos interrumpido nuestro estudio de la evolución para describir los ácidos nucleicos y las proteínas Vamos ahora a seguir desviándonos de nuestro objetivo principal para considerar los procesos moleculares en los que se basa toda la vida existente en nuestro planeta. Merece la pena que adelantemos acontecimientos para que cuando en el próximo capítulo estudiemos el surgimiento de la vida en nuestro planeta sepamos ya cómo pueden llegar a formarse estructuras vivas.

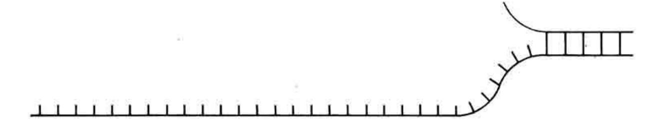
Consideremos una bacteria. La célula contiene una gran variedad de moléculas grandes y pequeñas. La molécula más grande es una cadena doble de ADN que, desarrollada, tiene una longitud 500 veces mayor que la de la bacteria Este hilo finísimo, de aproximadamente 1 mm de largo, constituye el «patrimonio hereditario» de la célula. Está compuesto por una secuencia de aproximadamente tres millones de pares de nucleótidos y contiene en forma codificada, todas las instrucciones necesarias para desarrollar leas procesos bioquímicos que mantendrán viva a la célula y permitirán su reproducción En una disolución nutritiva adecuada esta célula se dividirá cada veinte minutos.

En cada una de estas divisiones, las dos células hijas quedan dotadas con la herencia del código genético de la célula madre. Pero para que esto ocurra es necesario que antes de la división se haya elaborado *una copia exacta de la secuencia compuesta por los tres millones de pares de nucleótidos* que componen ese largo hilo del ADN, puesto que es precisamente esa secuencia lo que contiene —como si se tratara de un

mensaje escrito en clave— las instrucciones para la nueva célula. La duplicación del ADN parece imposible a primera vista; sin embargo, las especiales características del ADN permiten que se realice de forma sorprendentemente simple. La molécula doble del ADN puede abrirse como si fuera una cremallera:



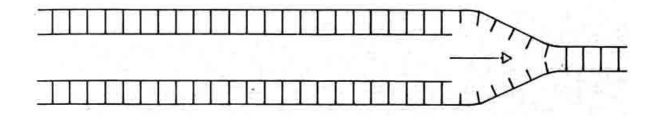
Los enlaces «débiles» que cierran los «peldaños» de la escalera presentan resistencia. Si consideramos esquemáticamente *una* cadena molecular de ADN abierta:



podemos determinar cómo estaba constituida la molécula doble. Sabemos que cada adenina tiene frente a sí una timina, y que cada guanina se empareja con una citosina. Por tanto, según estas reglas de apareamiento, podemos determinar inmediatamente la parte opuesta, aunque sólo conozcamos *uno* de los hilos de la cadena doble. Éste es precisamente el sistema que utiliza la naturaleza. En el interior de la célula —con ayuda de la catálisis producida por enzimas especializados (véase pág. 52)— se van acoplando en cada cadena simple del ADN los nucleótidos correspondientes (aquí representamos una sola cadena):



constituyéndose en una nueva cadena:

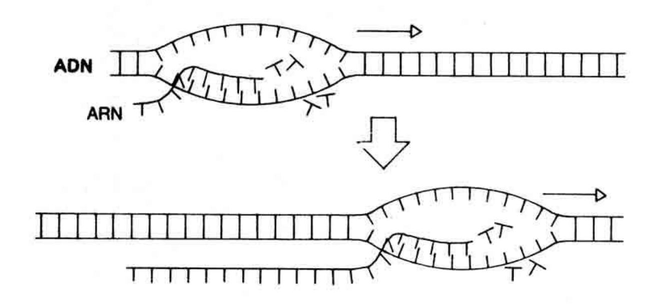


Así pues, a partir de la estructura existente puede reconstruirse la secuencia de los tres millones de nucleótidos en pocos minutos. Tenemos ahora dos ejemplares de la molécula de ADN. Cada una de las nuevas moléculas de ADN contiene una mitad de la antigua molécula y habrá completado de forma adecuada la otra mitad.

Éste es el principio de la autorreplicación del ADN, sobre el que se basa toda la vida. La doble estructura de las moléculas-código del ADN permite copiar con gran rapidez el mensaje cifrado, de modo que cuando se produce la división de la célula, las dos células hijas están dotadas con la misma información hereditaria.

¿Pero cómo puede realizar el ADN su segunda función, es decir, proporcionar información a la célula mediante la secuencia de nucleótidos? ¿Cómo se aplica en la práctica esa información genética?

Es aquí donde entra en juego el segundo tipo de ácido nucleico: los ARN. La «cremallera» abierta no sólo sirve para confeccionar una réplica del ADN, sino que con ella (y de nuevo mediante la ayuda de otro enzima específico) puede formarse también —por medio de una exacta correspondencia de nucleótidos— una cadena de ARN, puesto que los cuatro nucleótidos que constituyen el ARN son sumamente parecidos a los del ADN. Pero estas cadenas de ARN no copian toda la secuencia del ADN, sino sólo segmentos de ella. Tampoco permanecen unidos al ADN, sino que se separan comenzando por el lado que ya ha sido completado en este proceso de síntesis, permitiendo que vuelva a cerrarse la «cremallera del ADN». La «burbuja» en donde se da la apertura de la cremallera que permite la síntesis del ARN recorre toda la molécula del ADN:

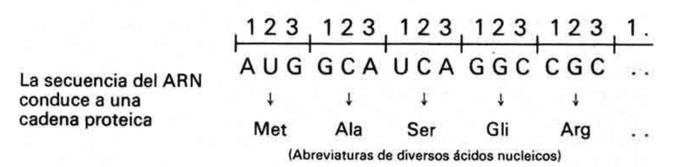


¿Y todo esto para qué? El ADN puede compararse con un libro de cocina que la célula hubiera heredado de sus antecesores. Para poder utilizarlo, la célula tomará algunas recetas, que estarán escritas en el código del ADN, y las pasará a un papel con la escritura del ARN. Este mensaje será ahora enviado a la cocina. El ARN transmite las órdenes de lo que hay que cocinar; por eso a este ARN se le denomina *ARN-mensajero.*

La célula contiene unas pequeñas bolitas, llamadas *ribosomas,* que tienden a unirse al ARN, y que podríamos comparar con los cocineros que son capaces de leer la receta. Estos cocineros traducen el mensaje del ARN al idioma de las proteínas: sintetizan *una cadena de aminoácidos* cuya *secuencia está determinada por la secuencia de los nucleótidos del ARN.* Este proceso sería similar al que se da cuando traducimos una palabra escrita en morse al lenguaje normal:



La descodificación de la escritura cifrada del ARN es bastante simple. A partir del extremo de la cadena de ARN se forman grupos de tres nucleótidos (representados por las siglas A, G, U y C) y por cada uno de los grupos así formados se toma un aminoácido, por ejemplo:



A cada tema de nucleótidos le corresponde un aminoácido determinado; este «sistema de traducción» es lo que se denomina *«código genético».*

Pero ¿cómo saben los «cocineros», es decir, los ribosomas, qué aminoácido deben emplear cuando se encuentran una determinada tema de nucleótidos? Aunque la respuesta es bastante sencilla, resulta difícil de explicar por sus detalles: el ribosoma (y una serie de moléculas que colaboran en el proceso de traducción. como ciertos enzimas activadores, ARN transferente y otros auxiliares de la traslación) y el trío del ARN que tienen que ser traducidos, se corresponden y complementan de tal modo que en ese punto crítico de la cadena de proteínas sólo puede acoplarse uno de los 20 aminoácidos existentes.

La idea clave aquí es el «ajuste». Toda la maquinaria del ribosoma con sus moléculas asistentes está concebida de tal forma que las superficies tridimensionales de determinadas moléculas presentan una forma específica para encajar con las superficies de otras moléculas. Y son estas superficies específicas las encargadas de que las reacciones químicas se produzcan sólo en determinada secuencia al permitir que se apareen sólo determinadas moléculas.

Esto da lugar a la formación de una gran estructura en la que se da una relación concreta entre las partes que la componen, de forma que «ajustan» o encajan unas con otras. Entre las superficies moleculares se dan determinadas correspondencias que ayudan al proceso de traducción. Pero ¿de dónde proceden estas superficies de diseño tan particular? ¿Cómo se produce toda la maquinaria del mecanismo de traducción molecular?

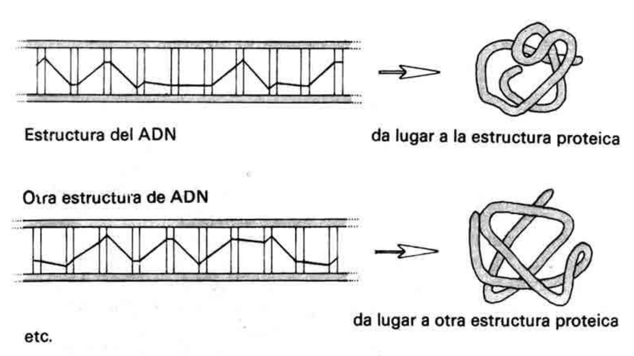
Pues bien, ya hemos visto que a partir de las indicaciones del libro de cocina (es decir, a partir de la secuencia del

ADN) se sintetiza una secuencia de aminoácidos. En el capítulo 6 describimos cómo una determinada secuencia de aminoácidos conduce a la formación de determinados pliegues. Cada secuencia da lugar, por tanto, a una proteína con una superficie característica; y ésas son precisamente las estructuras moleculares que necesita nuestra maquinaria de traducción.

De este modo, la maquinaria responsable de la síntesis de proteínas produce por sí misma —con ayuda de las indicaciones del mensaje del ADN— las superficies específicas necesarias. O sea, que por sí misma va creando pieza a pieza las partes de las nuevas «máquinas». A cada pieza, a cada superficie específica, le corresponde un segmento concreto del ADN que contiene, en lenguaje cifrado, los planos de construcción de esa superficie.

Por ejemplo, un ribosoma está compuesto por 58 elementos distintos, cuyas estructuras individuales están contenidas en 58 segmentos del ADN. Por tanto, la estructura de cada uno de estos segmentos del ADN genera (con ayuda de la maquinaria) otra estructura proteínica *completamente diferente*, cuya forma ya estaba determinada en el código del ADN.

Sería aproximadamente así:



Estas estructuras proteínicas generadas con ayuda de la maquinaria según los planos proporcionados por el ADN se unen posteriormente y por sí *mismas* (estableciendo enlaces débiles entre sus superficies correspondientes) para formar

más máquinas para la síntesis de proteínas que continúan ocupándose de la «traducción» del mensaje cifrado del ADN.

Así pues, podemos afirmar que el mecanismo de traducción se encuentra cifrado en toda la estructura del ADN. Sus estructuras parciales, diversas, pero coordinadas, determinan también la estructura de los ribosomas y las de sus ayudantes. Pero puesto que los ribosomas son necesarios para traducir la información de todos los segmentos del ADN, es necesario un proceso circular en el cual determinadas estructuras parciales, pero complejas, den lugar a otras estructuras semejantes.

Especialmente interesante resulta la transmisión de las estructuras unidimensionales (por su carácter unidimensional el ADN permite una réplica fácil) a las formas y estructuras tridimensionales de las proteínas. Resultaría mucho más difícil tratar de replicar superficies tridimensionales.

El segmento responsable de la formación de una cadena proteínica se denomina *gen*. Cada uno de los genes del ADN unidimensional contiene la información necesaria para formar una cadena proteínica. Ésta, mediante la formación de enlaces débiles, se pliega automáticamente, dando lugar a una estructura tridimensional que posteriormente tendrá una función determinada en el proceso general de duplicación de la célula.

Al considerar el fenómeno de la catálisis ya mencionábamos que las células vivas tienen la capacidad de producir ordenadamente superficies moleculares que permiten el desarrollo de ciertas reacciones que de otro modo no serían posibles. Ahora hemos conocido el procedimiento que da lugar a la formación de estos «enzimas»: la secuencia de los nucleótidos en un segmento del ADN «describe», por así decirlo, una proteína determinada con su correspondiente estructura de superficie. Un segmento del ADN, es decir, un gen, codifica un enzima que permite una determinada reacción química.

La célula necesita muchos enzimas, y no sólo para el mecanismo de traducción. También tiene que suministrar las moléculas elementales y «el combustible» —es decir, moléculas ricas en energía— necesarios para la síntesis del ADN, del ARN y de las proteínas. Gran parte del ADN de una célu-

la cumple solamente este propósito: determinar la formación de los numerosos enzimas que van a suministrar energía y componentes básicos para todos los procesos bioquímicos. Como hemos visto, otros genes se encargan de producir la maquinaria necesaria para la transmisión y conversión de" la estructura del ADN en una estructura proteica. Por último, otros genes se encargan de producir proteínas especiales que llevan a cabo la duplicación del ADN.

EL ADN SE ENCUENTRA, POR TANTO, EN EL CENTRO DE TODOS LOS PROCESOS VITALES. SU ESTRUCTURA TIENE LA FASCINANTE CAPACIDAD DE REPRODUCIRSE A SÍ MISMA CON AYUDA DE LOS ENZIMAS QUE ÉL MISMO PRODUCE GRACIAS A CIERTO MECANISMO. ESTE MECANISMO ESTÁ CODIFICADO EN LA ESTRUCTURA DEL ADN Y POSEE LA CAPACIDAD DE TRANSCRIBIR SEGMENTOS ESTRUCTURALES DEL ADN PARA CONFIGURAR ESTRUCTURAS PROTEICAS.

Podemos decir, por tanto, que en última instancia la estructura total del ADN existe sólo en función de su propia reproducción. *La vida tiene sólo una función: crear nueva vida.*

La descripción de los procesos moleculares quedaría incompleta si no mencionáramos el fenómeno de las mutaciones. Las mutaciones son los acontecimientos que introducen alteraciones y que, por tanto, constituyen la base de la evolución biológica.

Así como la mejor secretaria comete ocasionalmente algún error al mecanografiar un texto, también se producen fallos ocasionales en el proceso de descodificación y copia del mensaje del ADN. Entre los millones de letras (nucleótidos) que han de colocarse en la secuencia adecuada para que se lleve a efecto la duplicación del ADN de vez en cuando —aunque muy raramente— se produce algún error por parte de los enzimas implicados. A lo largo de todo el «texto», en algún lugar, puede introducirse una letra mal colocada, faltar una letra o. tal vez, ponerse por partida doble.

También pueden producirse errores de mayor envergadura: saltarse todo un párrafo o. por equivocación, copiarlo dos veces, ponerlo al revés, o colocarlo en un sitio que no corresponde. Todos los errores que pueden producirse al imprimir un libro, pueden producirse también ocasionalmente en el proceso de replicación del ADN. El concepto de «mutación» abarca todas las posibilidades de error. Cuál de estos errores se produzca y en qué lugar del ADN se produzca es una cuestión que depende por completo del azar. La palabra «azar» no es aquí ningún escudo tras el que tratemos de ocultar nuestra incapacidad para llegar a comprender correctamente las relaciones de causa y efecto implicadas en el proceso. Las mutaciones pueden ser causadas principalmente por desórdenes moleculares que se producen a corto plazo y que son imprevisibles. Se derivan de procesos cuánticos para los que es aplicable el «principio de indeterminación» de la física. Al igual que resulta imposible predecir la descomposición de los núcleos atómicos o el momento en que ésta puede producirse, también es imposible calcular el lugar y el momento en que va a producirse una mutación o el tipo de ésta. Podemos decir, por tanto, que el carácter aleatorio de las mutaciones es intrínseco a las propiedades básicas de la materia. Esta indeterminación de la materia volverá a interesarnos varias veces a lo largo de este libro.

En cualquier caso, el resultado de una mutación será que la célula reciba una información alterada. ¿Cuáles son las consecuencias de esto? Cualquier alteración en la estructura del ADN dará lugar, a través del mecanismo de traducción o transmisión de la información genética, a alteraciones en la estructura de las proteínas correspondientes. A veces la alteración es insignificante, en cuyo caso la mutación no merece mayor consideración. Pero en ocasiones puede haber quedado alterada la superficie crítica de una proteína, con lo cual ésta no podrá desempeñar su función, o lo hará de forma deficiente; la consecuencia de esto será una disminución de la capacidad vital del organismo. Mucho peor sería la falta de todo un segmento del ADN; la falta de vahas proteínas significa, con toda seguridad, la muerte.

Cuando la estructura del ADN ha llegado a tal grado de desarrollo que sólo da lugar a «moldes» de proteínas perfectos, cualquier alteración tendrá consecuencias negativas. Es muy improbable que un error de imprenta pueda mejorar un poema de Goethe. Sólo en casos muy extraordinarios la alteración en la información del ADN da lugar a una proteína capaz de desempeñar su función mejor que antes, o incluso capaz de realizar una nueva función.

Naturalmente, esto sólo puede aplicarse a los casos en que los moldes estén desarrollados al máximo. En los estadios iniciales, puesto que aún no se ha alcanzado la perfección, existiría la posibilidad de que un error casual condujera a un perfeccionamiento.

Las mutaciones son, por tanto, un arma de doble filo: por una parte son las responsables de que se produzcan organismos defectuosos: por otra, son precisamente las alteraciones las que ofrecen la posibilidad de perfeccionar funciones todavía en desarrollo. *Los errores en la duplicación son la fuerza motriz de toda evolución.*

8. LA TORRE DE LO IMPROBABLE

> «Nunca podré creer que Dios juega a los dados con el Universo.»
>
> EINSTEIN

Cuando hace ya 4.600 millones de años llegó al fin a formarse nuestro sistema solar por efecto de la gravedad y de la rotación, nuestra Tierra era un cuerpo celeste demasiado caliente para albergar vida alguna. Su atmósfera estaba constituida por vapor de agua, hidrógeno, dióxido de carbono, amoníaco, nitrógeno, metano y otros gases (nuestra atmósfera actual está compuesta por nitrógeno [78%] y oxígeno [21%] y es consecuencia de la fotosíntesis. Véase el cap. 11). El vapor de agua se condensaba en los estratos más fríos de la atmósfera, se precipitaba después sobre la superficie caliente de la Tierra y volvía a evaporarse inmediatamente. Poco a poco la superficie de nuestro planeta fue enfriándose, y las lluvias comenzaron a formar ríos, lagos y mares.

En la atmósfera y disueltas en el agua, había pequeñas moléculas simples. Sus enlaces fueron rotos por los rayos ultravioletas del sol, por las descargas eléctricas de los rayos y por el propio calor que la Tierra seguía emanando de su interior a través de la lava, los líquidos y los gases que surgían de los volcanes. Una vez desintegradas, las moléculas simples pudieron volver a combinarse formando moléculas mayores y más complejas. Estas moléculas fueron transportadas por la lluvia desde la atmósfera a los lagos y mares donde, con el tiempo, fueron enriqueciéndose. Los científicos han denominado «caldo primario» a esta solución acuosa que contenía moléculas prebiológicas.

Las reacciones químicas que se produjeron en las condiciones que presentaba nuestro planeta antiguamente han podido ser reproducidas en los laboratorios. En estos experimen-

tos se comprobó que en dichas condiciones se formaban elementos básicos para la formación de cadenas moleculares y para otros componentes que hoy podemos encontrar en las células.

Pero esto no sólo ocurrió en nuestro planeta; también en otras partes del Universo tuvieron que producirse reacciones parecidas. Los análisis del «meteorito Murchison» que cayó en Australia el 28 de septiembre de 1969 revelaron que contenía toda una gama de aminoácidos (glicina, alanina, glutamina, valina, prolina y otros), así como diferentes tipos de hidrocarburos; de estos últimos hay algunos que se hallan presentes en los organismos de los seres vivos de nuestro planeta.

Vamos a retomar ahora nuestro hilo rojo de la evolución cuestionándonos si en ese «caldo primario» —o al margen de él— pudo llegar a producirse de forma espontánea una combinación de elementos básicos que diera lugar a las cadenas moleculares de las proteínas y de los ácidos nucleicos. También en este sentido se han realizado experimentos en los laboratorios. Se ha podido descubrir, por ejemplo, que los aminoácidos tienden a unirse para formar pequeñas cadenas proteicas cuando en un ambiente seco la temperatura alcanza unos 160 grados. También se forman cadenas de proteínas en presencia de ácido cianhídrico (HCN) y amoníaco (NH_3). Resultados parecidos, aunque menos convincentes, se han obtenido para la formación de cortas cadenas de nucleótidos.

Este tipo de experimentos está limitado a las reacciones químicas que producen al cabo de unos meses cantidades apreciables de sustancias complejas. En cambio, el gran laboratorio donde se elaboró el caldo primario no sólo contaba con diferentes condiciones en las diferentes zonas de la Tierra, sino que disponía además de mucho tiempo: de millones y millones de años.

Una vez formados los primeros segmentos de cadenas moleculares, éstos pudieron servir de catalizadores para nuevas síntesis. Naturalmente, la ayuda que supuso el efecto catalítico de estas primeras cadenas moleculares no puede compararse con el efecto catalítico de las proteínas posteriores; eran

solamente los primeros y débiles comienzos de la formación de estructuras complejas. Sin embargo, ante la presencia de esta o aquella pequeña cadena proteica, puede que alguna reacción se produjera con mayor rapidez; quizás también aquí o allá pudo producirse el acoplamiento de elementos básicos que constituyeron los eslabones de cadenas complejas. Cuanto más largas se hicieran estas cadenas más podrían facilitar las diversas reacciones químicas de otras moléculas, y más rápidamente aumentaría el número de moléculas complejas en el caldo primario. El proceso era capaz de acelerarse a sí mismo.

De ahí que, aunque no conozcamos todos los detalles del proceso de desarrollo histórico de nuestro planeta, actualmente podemos saber cuál fue la siguiente fase de la evolución —apoyándonos en numerosos experimentos de laboratorio— como un desarrollo espontáneo que se produjo en cuanto se dieron las condiciones ambientales adecuadas. Podemos representar simbólicamente esta tercera integración de la siguiente manera:

$$\bullet \bullet \bullet \int \text{moléculas} \rightarrow \text{polímeros}$$

De nuevo podemos ver que mediante la asociación de elementos básicos más simples se configuran otros elementos —esta vez cadenas— de un nivel de complejidad más elevado, alcanzando ya una variedad prácticamente infinita de posibles estructuras.

Para simplificar, olvidémonos por el momento de que las proteínas están constituidas por 20 aminoácidos y de que los ácidos nucleicos se componen de 4 elementos básicos diferentes, e imaginemos que se trata de cadenas moleculares compuestas por 10 elementos diferentes, a saber: *a, b, c, d, e, f, g, h, i, k*. Estos diez elementos se hallaban en nuestro caldo primario aproximadamente en igual proporción y, de algún modo, se asociaron al azar para formar cadenas moleculares.

No nos detendremos a analizar la posibilidad de que se formaran cadenas de 6 elementos básicos, puesto que ello

dependería de las condiciones catalíticas del caldo primario, y no es una cuestión que nos interese ahora. Pero suponiendo que se hubieran formado cadenas de 6 eslabones, podría haberse dado perfectamente la secuencia *«kafdid»*.

Puesto que existen 10 componentes posibles, la probabilidad de que la *k* sea el primer eslabón de la cadena sería de 1/10. También es de 1/10 la probabilidad de que el segundo eslabón sea a, y así sucesivamente. Podemos decir, por tanto, que en una formación al azar de una cadena de seis eslabones, la probabilidad de que se produzca la secuencia *«kafdid»* es de:

$$1/10 \times 1/10 \times 1/10 \times 1/10 \times 1/10 \times 1/10 = 1/10^6 = 10^{-6}$$

Con la misma probabilidad podría producirse cualquier otra combinación de seis eslabones, como por ejemplo *«gabedi»*.

Si existieran innumerables pequeñas gotitas conteniendo las distintas cadenas de seis eslabones, y una de ellas contuviera la secuencia *kafdid*, ¿cuál sería la gotita que tendría mayor probabilidad de formar una cadena de seis componentes como *kafdida*? Con toda seguridad sería la gotita que contuviera la cadena *kafdid*. En ella sólo haría falta prolongar con el eslabón apropiado la secuencia ya existente, lo que no sería tan improbable.

En una gota que contuviera la cadena *kafdida* y además la cadena *gabedi* podría darse incluso la probabilidad de que, por fusión, se produjera la secuencia de 13 eslabones *kafdidagabedi*, aunque por su longitud esta secuencia sólo se presentaría una vez entre 10^{13} cadenas.

Así pues, vemos que la secuencia de grandes polímeros se produce por una serie de acontecimientos inicialmente fortuitos a los que, posteriormente y paso a paso, se van añadiendo otros acontecimientos igualmente fortuitos. Cuanto más avanza este proceso, es decir, cuanto más se acumula «casualidad sobre casualidad», más se va convirtiendo la secuencia de moléculas en una estructura que inicialmente hubiera tenido muy pocas posibilidades de configurarse. Las estructuras que

encontramos *a posteriori* eran *a priori* extremadamente improbables.

Si nos preguntáramos si una cadena de cien eslabones formada al azar podría presentar una secuencia previamente establecida, la respuesta tendría que ser «no», puesto que la probabilidad de que surgiera precisamente esa cadena sería de 10^{100}. Es decir, que incluso aunque esperáramos un tiempo indefinido, esa secuencia no se produciría *nunca* en nuestro caldo primario, puesto que es prácticamente imposible. Aun así, nuestro caldo primario tiene la capacidad de formar cadenas de esa longitud, y dichas cadenas tendrán que tener alguna secuencia; esto significa que alguna de esas secuencias inconcebiblemente diversas y «prácticamente imposibles» tendrá que realizarse. A la asombrosa improbabilidad de cada secuencia se opone la asombrosa diversidad de posibilidades. Una torre de improbabilidades conduce a configuraciones aparentemente «imposibles».

Los polímeros así formados, grandes y pequeños, no flotan en nuestro caldo sin que exista ningún tipo de relación entre ellos; de vez en cuando chocan y permanecen transitoriamente unidos entre sí. En los lagos y mares pululan grandes cantidades de segmentos de cadenas moleculares más o menos cortos de proteínas y ácidos nucleicos (estos últimos configurados generalmente como cadenas simples de ARN). Estos polímeros acabarán juntándose en la superficie de ciertas rocas y cavernas.

Así es cómo llegan a formarse —según se ha podido reproducir en experimentos de laboratorio realizados con segmentos de cadenas proteicas y de ácidos nucleicos— «agregados» compuestos por sólo unas cuantas cadenas moleculares o «amalgamientos» de numerosos polímeros. Estos agregados volverán después a desintegrarse en agregados más pequeños o en cadenas moleculares sueltas que, a su vez, se unirán entre sí para volver a desintegrarse al cabo de cierto tiempo. En este equilibrio de asociación y desintegración se produjeron cantidades inimaginables de combinaciones de

cadenas moleculares con las más variadas secuencias de componentes básicos.

En el encuentro entre determinadas cadenas moleculares se producen reacciones químicas. Las proteínas implicadas ofrecen un gran número de superficies que dan lugar a esta o aquella transformación de alguna molécula. Ocasionalmente puede ocurrir que algunos componentes básicos se unan a polímeros ya formados; otras veces serán cadenas enteras las que se unirán. Posiblemente hasta se llegue a reproducir «de mala manera» algún ácido nucleico. Pero cuando estos agregados se desintegran, sus componentes vuelven a ser cadenas individuales o pequeños agregados inorgánicos, todos ellos diferentes entre sí.

También en este estadio podría haber acabado la evolución. Habrían existido agregados y agregados por los siglos de los siglos. Pero la capacidad de la materia para constituir y desarrollar estructuras no termina aquí.

Hemos llegado ya hasta el umbral de la vida. Toda cadena de polímeros se basa en una «torre» de improbabilidades: cada continuación de esas cadenas es una continuación de dicha torre. La improbabilidad de las cadenas individuales de polímeros se multiplica. Hay una gran multitud y variedad de agregados, y todos ellos son diferentes «torres de improbabilidades». *Cada agregado molecular es un nuevo intento de traspasar el umbral de la vida.*

¿Qué posibilidades de éxito hay? ¿Podríamos contestar a las cuestiones fundamentales?

¿Es necesario que se desarrolle la vida? Supongamos que existen 100 planetas con iguales condiciones físicas: ¿surgiría la vida necesariamente en todos ellos?

¿Es la vida en nuestro planeta un «milagro» que va contra las leyes de la probabilidad, con la consecuencia que ello implica de que sea el único planeta con vida del Universo conocido?

Los científicos han dado muy diversas respuestas a estas preguntas, lo que demuestra claramente que nadie lo sabe con total seguridad. Las probabilidades de que se produzca la vida

no pueden ser calculadas, a pesar de que en los últimos años se haya avanzado mucho en la comprensión de innumerables detalles sobre el posible comienzo de la vida.

Por tanto, todas las opiniones que existen hoy en un sentido u otro —que la vida es un acontecimiento único, es decir, realmente un «milagro», o que la vida es el resultado inevitable de la asociación funcional de determinados polímeros— sólo son un reflejo de los prejuicios personales de quien las emite. Ambas afirmaciones se apoyan en suposiciones improbables o, al menos, aún no probadas; es decir, que son consecuencia de meras hipótesis y teorías científicas. Si no tenemos esto bien presente, estaremos alejándonos del terreno de los conocimientos establecidos y comprobados hasta el presente.

En los últimos capítulos de nuestro libro volveremos de nuevo sobre este punto para considerar, desde un contexto más general, esta cuestión que tanta importancia tiene para la comprensión de nuestra propia naturaleza.

9. LA IRRUPCIÓN DE LA VIDA

«El tejido del mundo se compone de azar y necesidad.»

GOETHE

Los agregados-polímeros se forman y vuelven a desintegrarse. Entre ellos se producen algunos con excepcionales tendencias asociativas, a los que se unen otras moléculas y polímeros. Estos polímeros se van ampliando hasta que en un momento dado vuelven también a desintegrarse. Todavía es pronto para afirmar que lleguen a formarse compuestos similares, pero algunas estructuras secundarias procedentes de anteriores desintegraciones vuelven a formar polímeros y vuelven a desintegrarse... ¿o acaso a dividirse?

Un visitante de otro planeta observa el pantano en que se halla ese caldo primario. ¿Puede detectar signos de vida? En las muestras del líquido que lleve consigo a su planeta ¿podrán los científicos descubrir vida en sus laboratorios bioquímicos? Con toda seguridad podrán identificar agregados, polímeros y moléculas, pero el desarrollo y división de los agregados es demasiado lento para que pueda ser advertido.

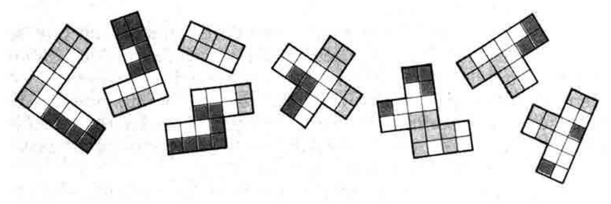
Sin embargo, en la infinita calma de nuestro pantano ha comenzado a producirse un proceso completamente nuevo: la lucha de los agregados contra su propia desintegración. ¿Es posible que un agregado consiga dividirse en dos mediante los rayos ultravioletas o el calor? ¿Consiguen los agregados de determinada «familia» (es decir, los residuos de una cadena desintegrada) continuar desarrollándose y dividiéndose, o sucumben después de la desintegración? Sólo los compuestos dotados de enlaces fuertes tendrán la posibilidad de perdurar. *Ha comenzado la lucha por la existencia.*

Pero las «familias» reproductivas no son verdaderas familias; sus miembros no muestran aún indicios de semejanza.

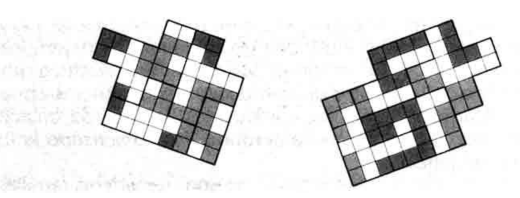
¿O tal vez en algunas familias sí? ¿Es posible que entre sus miembros se produzcan cadenas de ácidos nucleicos con secuencias de nucleótidos parecidas? ¿Es posible que estos agregados tengan proteínas que ayuden a duplicar —lenta, muy lentamente— los segmentos de ácido nucleico?

Hemos podido observar paso a paso la integración de los átomos y moléculas. En cada una de las etapas de combinación de los elementos básicos se constituyen nuevas unidades estructurales dotadas de nuevas propiedades y características. Sin embargo, todas esas innovaciones palidecen ante el nuevo campo de posibilidades para la formación de estructuras que se abre ahora ante nosotros.

Consideremos más detenidamente lo que ocurre en la transición de la fase material a la fase biológica de la evolución: en el caldo primario existe ya una gran diversidad de estructuras moleculares (es decir, de polímeros de aminoácidos o nucleótidos). Vamos a esquematizar de forma muy simplificada su carácter estructural, representándolos mediante cuadrados blancos, grises y grises oscuro:

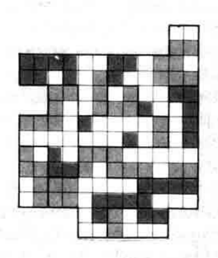


Estos polímeros se «enlazan» formando agregados:

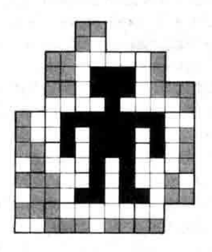


Un buen día estos agregados se desintegran, pero sus componentes básicos vuelven a asociarse con otros para formar nuevos agregados. De nuevo volverán a desintegrarse y a combinarse con otros componentes. El azar hará que se pro-

duzca una *infinita diversidad de estructuras diferentes entre sí*. A lo largo de muchos millones de años seguirán produciendo combinaciones que posteriormente volverán a desintegrarse.



Pero ¿qué ocurre? En un momento dado, se produce por azar una estructura extraordinariamente grande. Sus componentes básicos guardan determinada relación interna. Por azar, ciertos sectores de sus polímeros se acoplan de una forma muy especial. Y eso es precisamente lo esencial en una estructura viva. Sus componentes básicos no están combinados sin una relación determinada, sino que presentan un *tipo de interrelación* y *coordinación* muy *especial* que hace posible la autoduplicación del agregado, es decir, que le confiere la capacidad de realizar una copia de sí mismo.



Para ello tienen que existir proteínas que ayuden a traducir la secuencia de los componentes básicos de los ácidos nucleicos en secuencias de aminoácidos. Los ácidos nucleicos de nuestro agregado contienen secuencias que hacen posible la síntesis de esas proteínas. Los destinos de las proteínas y de los ácidos nucleicos están unidos en un proceso circular. El

«saber» (ácidos nucleicos) y el «hacer» (proteínas) se entrelazan formando una estructura.

Este proceso circular con efectos retroactivos supone una forma especial de combinación y acoplamiento de los diferentes módulos o sectores estructurales completamente revolucionario en nuestro planeta. Ha surgido un sistema de estructuración completamente nuevo que implica un tipo muy especial de información (véase el capítulo 5). A este tipo de información que permite la duplicación de la propia estructura se la denomina *información genética*. En nuestro modelo la hemos representado simbólicamente en forma de «imagen».

Una entidad viva, es decir, capaz de reproducirse a sí misma, tiene que poseer la capacidad de entender las «directrices» contenidas en sus ácidos nucleicos; por otra parte, esas directrices tienen que servir para reproducir estructuras y moléculas con la misma capacidad vital (véase el capítulo 7). Así pues, podemos reconocer la existencia de una interrelación de efecto circular que da lugar a una configuración en la que los componentes individuales o módulos guardan unas relaciones armónicas y congruentes con el conjunto total. En este proceso circular de cooperación se halla la información genética de una estructura biológica. Incluso los primeros conglomerados de polímeros con escasa capacidad de reproducción tienen que presentar indicios de esa capacidad de acoplamiento y coordinación de sus partes estructurales; capacidad que en principio se ha logrado por la combinación fortuita de estructuras más pequeñas.

Hasta el momento, la característica más importante de una estructura era la capacidad de poder servir como elemento básico para la configuración de unidades estructurales mayores. Se trataba, por tanto, de un papel pasivo. Ahora nos encontramos ya con estructuras que participan activamente en el proceso de reproducción, construyendo con los elementos básicos de su entorno otras estructuras semejantes. Ha comenzado la vida. Se abre un nuevo mundo. Al aparecer estructuras moleculares capaces de producir por sí mismas otras estructuras, la superficie del planeta va a transformarse y a poblarse de esas estructuras.

Las primeras estructuras con indicios de información genética serán muy imperfectas; sólo se duplicarán de forma muy lenta y no serán capaces de dar lugar a estructuras idénticas, sino sólo remotamente parecidas. En otras palabras: el principio de autoduplicación funciona de forma muy deficiente. Desde el punto de vista biológico todavía se producen demasiados «errores»; errores fortuitos en uno u otro sentido. Sin embargo, es precisamente esta inexactitud en las copias lo que constituye el mayor potencial de estas estructuras imperfectas.

Entre los innumerables cambios (mutaciones) cuyo resultado será debilitar o, peor aún, eliminar la escasa capacidad de autoduplicación, se producirán también ocasionalmente alteraciones que, por azar, contribuirán a mejorar o acelerar la capacidad de autoduplicación de estas estructuras imperfectas.

Si todos nuestros agregados moleculares se van autoduplicando con mayor o menor exactitud y rapidez, llegará un momento en que, en la inmensa variedad de estructuras que poblarán nuestro caldo primario, predominarán aquellas que sean capaces de autoduplicarse con mayor rapidez que las demás. Y dentro de éstas, las que encontraremos con más frecuencia serán aquellas que se dupliquen con más exactitud, puesto que producirán réplicas de un mismo tiempo, y no variantes defectuosas. Por tanto, entre las innumerables y variadas configuraciones capaces de autoduplicarse, *los tipos que más proliferen serán por fuerza aquellos que se reproduzcan con mayor rapidez* y *perfección que los demás.*

El principio de la *duplicación inexacta* conlleva un *mecanismo de perfeccionamiento*, es decir, una tendencia hacia una autoduplicación más rápida y más exacta. Es como si las estructuras trataran de salir de la ciénaga de la lentitud y la inexactitud tirando de su propia coleta (por compararlo con el cuento del Barón de Münchhausen).

La inexactitud conduce, en la mayoría de los casos, a una disminución de la capacidad de autoduplicación; o sea. a que la duplicación sea aún más lenta, más defectuosa o incluso a que desaparezca la capacidad de volver a reproducirse. Por el contrario, las estructuras que experimentan alteraciones me-

nos frecuentes y que, por casualidad, logran fortalecer su capacidad de autoduplicación tenderán a perfeccionarse y proliferar.

Así pues, las unidades estructurales cuyos componentes básicos o módulos establezcan una interdependencia orgánica más perfecta serán las que más posibilidades tengan de prevalecer «Supervivencia de los más aptos» se denomina, ya desde este estadio, a la supervivencia de los más «adaptados»; a la supervivencia de las estructuras de configuración más armoniosa.

Estamos acostumbrados a considerar la inexactitud como algo negativo. Sin embargo, es precisamente la inexactitud lo que contribuye al perfeccionamiento de las estructuras en su proceso de duplicación. Y, como tendremos ocasión de ver más adelante, es también la inexactitud lo que hace posible la comunicación lingüística. La inexactitud es también lo que ha dado lugar en la física a uno de sus principios fundamentales: el principio de indeterminación. La inexactitud de la naturaleza es la base de toda evolución. Es el azar presente en todo fenómeno natural; la *libertad* de nuestra estructura en su desarrollo autorrestringido.

Vemos por tanto que la autoorganización de la vida se ha originado y se ha fomentado gracias a la inexactitud. Una alteración fortuita sucede a otra; las que contribuyan a fortalecer la armonía de la información genética son aprovechadas, mientras que las que sólo contribuyen a su debilitamiento van hundiéndose con la masa de agregados incapaces de autorreproducirse.

La torre de improbabilidades sigue creciendo hasta lo inconcebible: con cada mutación que contribuye a un perfeccionamiento de la capacidad de autoduplicación aumenta aún más la «imposibilidad» matemática de la estructura. Es como si se tratara de un juego de dados en el que sólo contaran las tiradas en las que aparece un seis. Sólo estas mutaciones son las que, a través de la información genética, pasarán a ser parte de las características de las réplicas descendientes de la estructura. Todas las demás mutaciones no tendrán mayor trascendencia en el futuro y caerán en el olvido. Si leyéramos

la anotación de los resultados de las tiradas con el dado y sólo hubieran quedado registrados los seises, pensaríamos que era imposible que hubiera salido en todas las tiradas. Los organismos que pueblan nuestro planeta son como una «anotación» seleccionada de resultados, en la que sólo se han registrado las tiradas afortunadas; solamente lo positivo ha sido transmitido a los descendientes. Todas las demás tiradas —y habrán sido muchas, muchísimas— han sido ignoradas y olvidadas.

Una estructura viva está sometida constantemente a alteraciones y ampliaciones fortuitas; que éstas sean consignadas o no en el acta de su legado depende de si esas alteraciones pueden *integrarse de forma armónica en la estructura* ya *existente.*

La estructura no decide qué mutaciones son posibles, pero calibra y compara cada alteración con las relaciones armónicas ya existentes. Las mutaciones apropiadas son asimiladas, las inapropiadas son desechadas. El resultado fortuito de las mutaciones es filtrado: en el filtro (selección) sólo queda recogido lo que puede ser integrado en la configuración ya existente.

La estructura que se ha configurado a consecuencia de toda una serie de casualidades determina ahora cuáles son los cambios fortuitos que pueden ser aceptados y cuáles no. Lo pasado influye directamente sobre lo futuro. La estructura continúa desarrollándose.

Las tres últimas páginas son de vital importancia para la comprensión de todo proceso evolutivo. Aunque todo parezca haber quedado claro, recomendamos al lector que vuelva a considerar con calma todo lo que se ha expuesto en estos párrafos.

Las estructuras no sólo van adquiriendo constantemente una información genética más precisa y efectiva, sino que además continúan desarrollándose en magnitud. Las cadenas van prolongándose con uno o varios eslabones más, que tal vez contribuyan a mejorar su funcionamiento. A veces puede ocurrir que todo un polímero se integre en una estructura o

incluso que legue a producirse la unión entre dos estructuras capaces de autoduplicarse. Esto puede dar lugar a la configuración de una estructura de autoduplicación particularmente eficiente y rápida por suma y complementación de las propiedades de ambas partes asociadas. Unidas, estas dos estructuras serán superiores a todas sus compañeras.

A continuación intentaremos —utilizando una analogía lingüística— representar de forma simbólica los procesos que, a través de la duplicación inexacta, de la ampliación de estructuras por prolongación fortuita de sus cadenas, o de la fusión de estructuras con capacidad de autoduplicarse, han contribuido al perfeccionamiento y eficiencia de las estructuras más desarrolladas. Para ello representaremos los polímeros y agregados mediante letras y grupos de letras; la información genética de las estructuras, es decir, su capacidad de autoduplicación quedará simbolizada por el grado de *sentido lingüístico* de la secuencia de letras. Cuanto más sentido lingüístico tenga una secuencia, con más rapidez y exactitud podrá autoduplicarse.

Así, por ejemplo, la secuencia de letras «ES» representa una estructura que, aunque pequeña, es armónica y tiene capacidad de autorreproducción (sentido lingüístico). Por el contrario, la secuencia «RUSLMA», si bien es más larga, representa un agregado no armónico; carece de sentido lingüístico, es decir, de capacidad de autoduplicación.

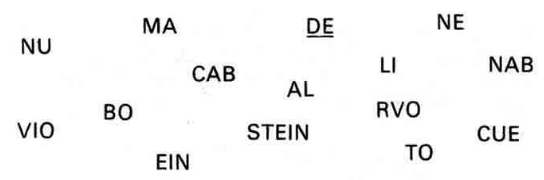
Volvamos de nuevo por un momento a los comienzos de la vida. El caldo primario se halla plagado de polímeros y agregados poliméricos:

M FM SIDT W PL RD TGE MNS RZE B
ECF KD OLRI ZLM HUW GA RILER
F GCA KIR HFO VSV

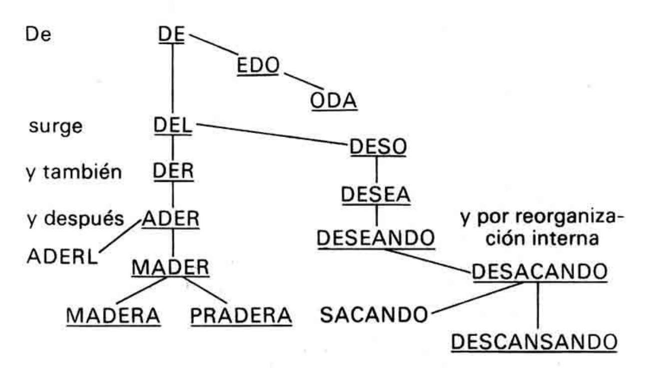
En algún sitio y en algún momento se produce una primera estructura con sentido lingüístico:

DE

Resaltamos su capacidad de autoduplicación imprimiéndola en subrayado. Esta estructura comenzará por tanto a producir similares a ella y, en ocasiones, conseguirá incluso producir copias exactas de sí misma:



Algunas de estas estructuras derivadas presentan una armonía propia (sentido lingüístico resaltado por la impresión en subrayado), pero la mayoría no; por tanto, no podrán autoduplicarse y algún día volverán a desintegrarse sin dejar huella en nuestro planeta. Pero sigamos observando el desarrollo que se ha iniciado:

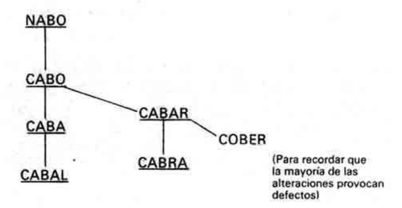


Podemos ver cómo de una estructura original se van produciendo copias inexactas. Todas están sometidas a alteraciones; las que no son armónicas (es decir, que carecen de sentido lingüístico) no tienen descendientes, por lo que podemos ignorarlas.

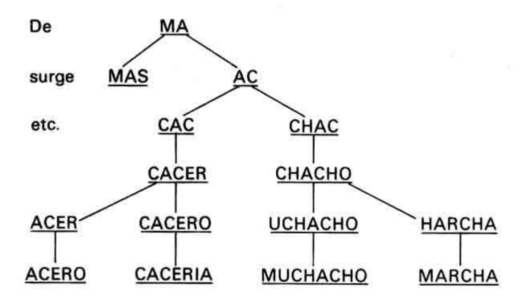
Las estructuras armónicas irán, en cambio, reproduciéndose a sí mismas con mayor rapidez cuanto mayor sea su conte-

nido lingüístico, es decir, su información genética. De ahora en adelante daremos este hecho por sobreentendido.

En algún otro lugar de nuestro caldo primario puede producirse por casualidad otra estructura armónica:

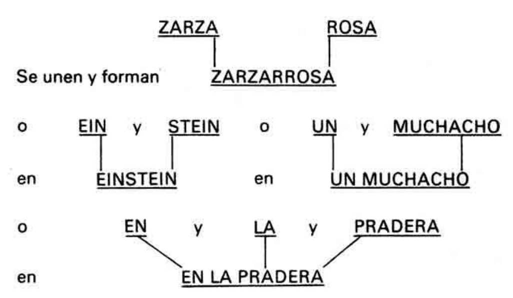


Y quizás también una tercera «familia»

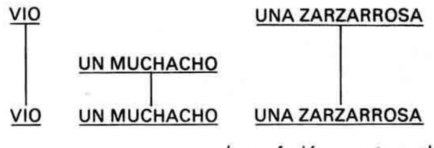


Mientras van produciéndose y ampliándose nuevas familias, se produce también un proceso de fusión entre dos de estas estructuras armónicas:

La información genética, es decir, la capacidad de autorreproducción, va perfeccionándose cada vez con mayor rapidez.



El proceso de fusión sigue desarrollándose:



El contenido lingüístico de nuestra estructura es ahora muy elevado; sólo hacen falta unas cuantas fusiones más y algunas alteraciones mínimas y la armonía de la información genética será ya perfecta:

UN MUCHACHO VIO UNA ZARZARROSA EN LA PRADERA

En este modelo lingüístico —al igual que en el que dio lugar al desarrollo de la vida— se produce un aumento constante del contenido de información. Y esto se da en dos sentidos: por una parte, va aumentando la magnitud de las estructuras: por otra, aumenta la interrelación armónica interna entre los componentes básicos de la estructura, potenciando por tanto su eficiencia.

Esta analogía lingüística del surgimiento de una estructura superior capaz de una perfecta autoduplicación pone de manifiesto nuevamente la característica fundamental de este proceso: la torre de improbabilidades.

Configuraciones inicialmente fortuitas (DE, NABO, MA) se van desarrollando, a través de otros conocimientos casuales, para configurar estructuras cada vez mayores. Cada nuevo paso está basado en los acontecimientos fortuitos pasados. Cuanto mayor se hace la estructura, mayor diversidad de formas puede adquirir. Pero esta *libertad* está *limitada* por los mismos acontecimientos fortuitos que en el pasado fomentaron ese desarrollo. Para hacer más comprensible lo anteriormente dicho, consideremos lo siguiente: en la muestra del caldo primario que hemos tomado hubiera podido producirse

también la siguiente estructura lingüística con capacidad de autorreproducción:

EINSTEIN VIO UN CABALLO Y UN CUERVO
EN UNA PRADERA

Para ello existían todas las condiciones necesarias. Sin embargo hubiera sido imposible que —partiendo de nuestro principio— se hubiera desarrollado la siguiente estructura:

CUBRE TU CIELO, OH ZEUS, CON TINIE-
BLAS

Hemos llegado ahora a la segunda fase de la evolución del Universo. Las integraciones han dado lugar a estructuras con capacidad de autorreproducirse. Estas estructuras no son aún células completas como las que componen los organismos vivos que conocemos actualmente, pero sí son unidades cuyos componentes básicos se hallan en perfecta armonía. En nuestro esquema podemos caracterizar este importantísimo paso del proceso de la evolución de la siguiente manera:

$$\bullet \bullet \bullet \int \text{polímeros} \longrightarrow \text{protobiontes}$$

La vida ha hecho acto de presencia y va tomando posesión de la superficie de nuestro planeta. Ahora habrá nuevos principios biológicos que nos acompañarán en nuestro seguimiento del hilo evolutivo.

10. CÓMO APRENDIÓ LA VIDA A VIVIR

«... una nueva ciencia a la que quiero bautizar con el nombre de biología.»

LAMARCK

La evolución biológica se basa en la capacidad de las estructuras de producir nuevas estructuras. Ya en la fase material se puede observar ocasionalmente este principio; por ejemplo, en el interior de las estrellas (cuando existe una temperatura suficientemente alta) un núcleo de carbono puede asimilar, uno detrás de otro, hasta cuatro protones individuales, para después expulsarlos en forma de partícula (ciclo del carbono). Más tarde, en el proceso de evolución de la materia, la catálisis permite la construcción de estructuras moleculares sobre superficies estructurales ya existentes.

Con la aparición de unidades «vivas», el principio de que *«las estructuras generan nuevas estructuras»* llega a un nuevo grado de perfección en la autoduplicación. Sin embargo, la mayor perfección de esta capacidad de autoduplicación es su «sólo cuasi-perfección». Sin inexactitudes, es decir, sin que se produzcan errores ocasionales fortuitos, toda evolución resultaría imposible. Los errores en la duplicación y la subsiguiente selección de las alteraciones «apropiadas» constituyen la fuerza motriz de una proliferación de estructuras cada vez más rápida.

La continuación del desarrollo es inevitable. La inexactitud de la reproducción de las estructuras no deja otra alternativa. Y es esa misma inexactitud la que hace que se sigan produciendo errores. Incluso si se llega, o mejor dicho, cuando algunas estructuras llegan al nivel «pseudoideal» de autorreproducción, dejan de tener significado para el desarrollo de la evolución, puesto que esa perfección las mantendría en el nivel de desarrollo alcanzado y pronto serían superadas por

otras estructuras «menos perfectas». Lo que resulta sorprendente es que algunos agregados moleculares adquieran esta nueva propiedad de autoduplicarse imperfectamente junto a la ineludible necesidad de seguir desarrollándose.

La transición a la segunda fase de la evolución hace que el desarrollo y la proliferación de las estructuras se independicen de ciertos factores que hasta entonces habían desempeñado un papel importante. Es más, los factores físicos que hasta ese momento habían potenciado la evolución se convierten ahora en agentes nocivos para las estructuras. Así, por ejemplo, mientras que antes las descargas eléctricas, las elevadas temperaturas o los rayos ultravioletas eran elementos importantes para la configuración de estructuras moleculares complejas, ahora constituyen un peligro para las estructuras biológicas. Sus configuraciones son tan armónicas y precisas que cualquier influencia exterior podría ponerlas en peligro. El comienzo de la fase biológica trae consigo, además de nuevas propiedades, nuevas «reglas de juego»; por ejemplo, la competencia. Volveremos a encontrar un fenómeno análogo cuando lleguemos a considerar la transición de la fase biológica a la fase intelectual.

Hasta ahora no nos habíamos preguntado de dónde provienen los componentes básicos necesarios para la formación de las copias generadas por la autoduplicación de las estructuras biológicas. Hemos asumido tácitamente que estos componentes se encontraban en el caldo primario y eran asimilados por la «estructura-madre». Una vez configurada por completo la estructura-hija, el complejo se dividía en dos unidades similares que volverían a comenzar el proceso de autoduplicación.

Así sería en un principio, puesto que cuando surgieron las primeras unidades biológicas, el caldo primario era muy rico en moléculas de todo tipo, de manera que obtener los elementos necesarios no suponía ningún problema. Las formas de vida primitiva se limitaron a «consumir» las enormes reservas de componentes básicos que se habían acumulado a lo largo de millones de años de evolución bioquímica.

Pero según se fueron reproduciendo las estructuras biológicas, fue surgiendo la necesidad de buscar suministros. Pronto empezarían a escasear los tipos más simples de componentes moleculares, lo que supondría un gran impedimento para la continua reproducción de las estructuras. El suministro de las moléculas que escaseaban, que tenía que producirse de forma casual y espontánea, tuvo que ser extremadamente lento. Parecía dudoso que la vida continuara existiendo y desarrollándose.

Sin embargo, debido a la inexactitud en la autoduplicación había llegado a producirse una enorme variedad de estructuras biológicas de todo tipo, y se habían formado una gran diversidad de superficies proteicas; ésa fue precisamente la solución. Por casualidad, algunos de los protobiontes ya formados presentaban superficies capaces de transformar elementos básicos todavía abundantes en aquellas moléculas que escaseaban.

Algunos de esos protobiontes disponían incluso —siempre por casualidad— de segmentos de ácidos nucleicos capaces de producir esas estructuras moleculares que de repente se habían convertido en elementos vitales. Y fueron precisamente estos protobiontes los que ganaron en esa lotería del azar: podían producir por sí mismos la preciosa y escasa molécula, con lo que aseguraron para sí y para sus descendientes la capacidad de reproducción. Había empezado el proceso denominado *metabolismo*, proceso que caracteriza a todos los organismos vivos. Todas las demás estructuras existentes encontraron imposible poder seguir autoduplicándose y más pronto o más tarde sucumbieron a la desintegración, a la muerte termodinámica.

Pero mucho antes de que hubieran podido perfeccionar este mecanismo empezaron a escasear también otros elementos básicos. Otras proteínas que existían por casualidad y que tenían la capacidad de transformar otros elementos básicos en «moléculas sustitutivas» se hicieron imprescindibles para suplir la carencia de los elementos básicos esenciales. El proceso de agotamiento y sustitución fue repitiéndose innumerables veces.

En todos los procesos de sustitución las superficies catalíticas eran al principio bastante imperfectas; su funcionamiento era muy lento. Pero la autoduplicación imperfecta de las estructuras condujo por azar a un perfeccionamiento de la capacidad de síntesis.

Así pues, el desarrollo que hemos estudiado aquí de forma lineal y paso a paso, se produciría más bien como un amplio proceso de continuo perfeccionamiento y ampliación de diferentes fenómenos metabólicos.

La capacidad de reproducción se fue haciendo cada vez más dependiente de la capacidad de sintetizar los elementos básicos necesarios para la autoduplicación a partir de las moléculas disponibles. Esto constituyó un estímulo para la asociación de estructuras biológicas: cuando una unidad estructural era capaz de sintetizar la molécula X y otra la molécula Y, al asociarse dejarían de ser dependientes de estas dos sustancias (X e Y) en proceso de extinción.

La duplicación fortuita de segmentos individuales del ADN ofrecía otra posibilidad para la reproducción: cuando la producción de un enzima necesario para el metabolismo dependía de un gen (véase capítulo 7), dicho gen no debía alterarse fundamentalmente, puesto que su función resultaba necesaria; pero cuando, debido a la duplicación, llegaban a existir *dos* copias de un mismo gen, una de ellas podía ser transformada y aprovechada según las necesidades de la estructura, puesto que la otra se ocuparía de producir el enzima.

Una ampliación de la cantidad de ADN pone a disposición de la estructura un material con el que pueden «jugar» las mutaciones. Es más, este tipo de «materia prima» proporciona una proteína provista de superficies que permiten la asimilación de determinadas moléculas.

El caso es que con el agotamiento progresivo de la cantidad de moléculas contenidas en el caldo primario, las estructuras —mediante las proteínas apropiadas— tuvieron que empezar a sintetizar cada vez más componentes básicos a partir de las moléculas existentes más adecuadas. Pronto llegarían a escasear incluso éstas, de modo que las estructuras tuvieron que transformar otras moléculas a fin de, en un se-

gundo proceso, poder sintetizar los componentes básicos para su autoduplicación. De esta manera, paso a paso, se fueron formando largas «cintas transportadoras» en las que eran transformados diferentes tipos de moléculas. Las unidades estructurales capaces de reproducirse, que eran cada vez mayores, habían llegado a reunir todo un arsenal de estructuras parciales vitales (los enzimas del metabolismo. codificados en el ADN) capaces de producir las moléculas necesarias para la autoduplicación.

Pero aún había que resolver otros problemas. Puesto que había aumentado su complejidad, una unidad estructural viva necesitaba tal cantidad de enzimas que era necesario que se rodeara de una envoltura protectora que, por una parte, impidiera la pérdida de elementos importantes de su interior y, por otra, permitiera la asimilación de todas las moléculas necesarias del exterior. De ahí que las estructuras más competitivas fueran las que consiguieran desarrollar una envoltura protectora «selectiva y permeable» con la que podían regular y seleccionar el paso de las moléculas hacia el interior.

Es muy probable que las primeras estructuras con capacidad de autoduplicación poseyeran ya algún tipo de membrana o envoltura primitiva desarrollada de forma espontánea a partir de sus proteínas. Tal vez esa envoltura tuviera un papel fundamental en el surgimiento de la vida. Lo que resulta evidente es que con el aumento de la complejidad de las estructuras, la membrana protectora tuvo que ir adquiriendo una serie de características cada vez más sofisticadas.

De cualquier modo, la cuestión esencial para la fase inicial de la vida fue la aparición del código genético. Recordaremos que con ello nos referimos a que a cada grupo de tres nucleótidos corresponde un aminoácido de una proteína, y que esta «traducción» se lleva a cabo mediante el acoplamiento de estructuras moleculares (véase el capítulo 7).

Todos los organismos vivos que conocemos actualmente —ya sean plantas, animales, bacterias o seres humanos— emplean el mismo *diccionario* para la traducción del código genético (universalidad del código genético). El hecho de que

este complejo proceso de síntesis de proteínas se base en el mismo principio de correspondencia de formas en todos los organismos de nuestro planeta, sólo puede tener dos explicaciones:

1. El *diccionario* del código es realmente fortuito. Las correspondencias de ese diccionario son producto de la «torre de improbabilidades», por tanto podría haber sido también de cualquier otra forma. Esto implicaría que los organismos vivos de otros planetas podrían emplear un código similar, pero con otras correspondencias.

Tal suposición nos lleva a la conclusión de que todos los organismos vivos de nuestro planeta provienen de una misma célula primaria que, por azar, hizo un descubrimiento fundamental; tal vez el del código genético. Siguiendo esta línea de pensamiento es evidente que una estructura biológica llegó a estar tan avanzada en su desarrollo que superó y dejó atrás a todos sus competidores, que, poco a poco, fueron desintegrándose y desapareciendo.

2. También es concebible que las correspondencias del diccionario genético no hayan sido producto del azar, sino que por la forma de las moléculas participantes fuera ésa la única posibilidad existente. Dicho de otro modo: en el organismo primario, en el que se desarrolló y perfeccionó el código genético, las características de las moléculas no permitían que se elaborara ningún otro «diccionario». Esta afirmación encierra un grado de complejidad tal que es muy difícil de comprender, e implica además que en otros planetas tendría que haberse desarrollado e! mismo código genético.

La genética molecular no ha podido hasta ahora decidir esta alternativa. Quizá la cuestión quedará abierta hasta que lleguemos a conocer en otros planetas una vida con un origen independiente.

En cualquiera de los casos, un código que haya llegado a establecerse —ya sea por azar o determinado químicamente— no puede sufrir alteraciones importantes en el transcurso de la evolución. Como mucho, pueden introducirse algunas

mejoras. Una alteración de las correspondencias del diccionario de traducción significaría una catástrofe para el organismo mutante. Por ejemplo, si el mecanismo de la síntesis de proteínas se alterara por una mutación de modo que en donde antes correspondía la alanina se colocara la treonina, *todas* las proteínas quedarían afectadas. Muchas perderían totalmente su funcionalidad. El organismo afectado no podría superar esta carencia funcional y sucumbiría ante la selección.

La posibilidad de que toda la vida de la Tierra se haya desarrollado a partir de una única estructura o célula primaria que, por azar, hubiera dado con el código genético y estuviera mucho más adelantada que todas las demás, volverá a planteársenos por segunda vez.

En el capítulo 5 habíamos hablado de que existen moléculas con configuraciones especulares (como la mano izquierda y la derecha). Hace ya mucho tiempo que los bioquímicos saben que estas dos formas (isómeros) poseen propiedades diferentes, a pesar de que su composición química es idéntica, y que los organismos de nuestro planeta sólo pueden utilizar directamente una de las dos formas. De esto se deduce que hay gran cantidad de moléculas biológicas que no pueden ser utilizadas directamente por los seres vivos.

Teóricamente los dos isómeros podrían tener la misma funcionalidad. La preferencia por una de las dos configuraciones especulares ¿fue una elección casual de una única célula primaria (de la que desciende toda forma de vida) o hay otros motivos (por ejemplo, la polarización de los rayos del sol y de otras radiaciones, los campos magnéticos, la dirección de los giros, etc.) que han favorecido a una de las dos formas especulares? Como puede verse por los análisis químicos de los meteoritos —y también por la síntesis artificial de moléculas en los laboratorios— fuera de nuestro planeta se dan ambas formas en proporciones prácticamente iguales. Si la elección entre la forma izquierda y la derecha dependiera del azar, un 50% de los planetas con vida tendría «vida izquierda» y otro 50% «vida derecha». Si se llegara a descubrir un planeta parecido al nuestro pero que tuviera una simetría especular desde el punto de vista bioquímico, no

podríamos alimentamos de los frutos de su naturaleza. Los enzimas que actúan en el proceso de asimilación de los alimentos no podrían actuar sobre sus moléculas. Tampoco los conejos de la Tierra podrían alimentarse con la hierba de ese planeta. Toda nuestra existencia está basada en aminoácidos «izquierdos». Para poder vivir en ese planeta tendríamos que llevarnos allí *nuestro* ganado y *nuestra* hierba.

Ambas cuestiones, el motivo de la preferencia por uno de los dos isómeros y el origen de la configuración del código genético, esperan todavía una explicación científica. Pero estos dos fenómenos quedarían justificados si se llegara a demostrar que, hace muchísimo tiempo, en la mezcla de estructuras (izquierdas y derechas) surgió una célula primitiva que, por los motivos que fuera (¿la perfección de su código genético?), consiguió superar a todas las demás. De haber sido así, todas las formas de vida actuales se habrían desarrollado a partir de esa célula primaria y, por tanto, habrían conservado su preferencia por un isómero en particular y su código genético.

Pero esto no equivale a decir que en nuestro planeta haya surgido *una sola vez* una estructura capaz de autoduplicarse; ésta es sólo una de las interpretaciones posibles. Aunque llegara a demostrarse que ambos fenómenos son producto del azar, no se habría demostrado más que, en los comienzos del desarrollo de la vida, en algún momento se habría producido una célula primaria que, por su mejor funcionamiento, consiguió dejar atrás a todas las demás, y que proliferó de tal forma que sólo sus descendientes pueblan la Tierra. Podría haber sido la primera y, por aquel entonces, la única unidad capaz de autorreproducirse; pero también puede ser que se tratara de una célula primaria que, coexistiendo con muchas otras células, hubiera conseguido desarrollar posteriormente una nueva característica extraordinariamente importante.

Hemos visto, pues, que a partir de la formación de las primeras estructuras capaces de autoduplicarse quedaba aún un largo camino: tenía que configurarse todo un mecanismo formado por cientos de enzimas diferentes que hiciera posible

el metabolismo; tenía que perfeccionarse dicho mecanismo para adaptarse a los cambios de las exigencias metabólicas; era necesario que se constituyera el código genético con su complicado mecanismo de síntesis de proteínas. Y, al mismo tiempo, era necesario también que se perfeccionara la organización interna de la estructura. Sólo la transmisión fiel y segura de la información genética codificada en el ADN a las estructuras hijas, tuvo que requerir lentos e innumerables procesos de aproximación, por ejemplo, conseguir sincronizar la autoduplicación del ADN y la partición de la estructura o la unión de los diferentes segmentos del ADN según la receta de los enzimas individuales para conseguir un hilo más o menos largo de ADN. Y todo esto *tuvo* que ocurrir porque, aunque el azar hiciera surgir todo tipo de estructuras, sólo las variantes mejores podrían sobrevivir en la fuerte competencia existente.

Si comparamos todas estas nuevas propiedades, todos los perfeccionamientos de la organización interna y este potencial efectivo de la información genética, con las características de las primeras estructuras «vivas», podremos apreciar el largo camino que tuvo que recorrer la evolución en un período de mil millones de años aproximadamente.

11. DOS SOLUCIONES A LA CRISIS ENERGÉTICA

> «El reino vegetal constituye una reserva en la que los etéreos rayos del sol son fijados y aprovechados hábilmente: este fenómeno, que es un modelo de ahorro de energía, está estrecha e inexorablemente ligado a la existencia de la humanidad.»
>
> J. R. MAYER

Hasta ahora hemos hablado de los componentes básicos y de las moléculas capaces de sustituirlos sin prestar atención a la cuestión de la energía de las moléculas. Para que las moléculas puedan reaccionar químicamente —por ejemplo, para que puedan ser utilizadas como módulos o eslabones para prolongar una cadena molecular— es necesario que su propia estructura molecular contenga suficiente energía, de modo que al establecerse un enlace químico se libere en parte en forma de calor.

En el metabolismo se trata muchas veces de separar de una molécula rica en energía —aunque por lo demás inservible como elemento básico— la parte portadora de la energía para transmitírsela a otra molécula, apropiada como elemento básico, pero carente de energía. De ahí que con el progresivo desarrollo, las «moléculas-sustituto» fueran aprovechándose cada vez más como elementos básicos en potencia o como proveedores de energía.

La rápida proliferación en el caldo primario de estructuras capaces de desarrollarse hizo que fueran agotándose poco a poco las moléculas más útiles. Bajo la presión selectiva derivada de esta escasez se fueron desarrollando cada vez más las funciones metabólicas de las estructuras superiores. Las moléculas grandes fueron siendo integradas como elementos básicos o como portadoras de energía en el proceso de auto-

duplicación de la materia viva. Poco a poco, sólo quedaron las pequeñas moléculas que no servían para cumplir ninguna de estas funciones. El empobrecimiento del caldo primario trae consigo dos consecuencias importantes: primero, ya no puede darse un nuevo comienzo de la vida: ya no puede *surgir otro tipo de vida* puesto que faltan los polímeros necesarios para la construcción de agregados. Segundo, tampoco hay condiciones para una evolución de la materia, es decir, para la configuración espontánea de moléculas complejas, puesto que todas las moléculas medianamente grandes que hubieran podido fomentar una evolución ya han sido asimiladas por las estructuras vivas. *La propagación de la vida impide la evolución material de sus componentes fundamentales.* Donde comienza la segunda fase de nuestro hilo evolutivo tiene que concluir la primera. Sin embargo, en el Universo la materia sigue evolucionando. Cada una de las estrellas que brillan en el firmamento da testimonio de ello.

Los resultados —producto de la fase de evolución material— no han perdido, sin embargo, significado en nuestro planeta; por el contrario, constituyen precisamente los elementos que ahora empiezan a interrelacionarse según las leyes que instituye la vida, y a integrarse en el sistema superior de las estructuras biológicas. La materia sigue siendo la base de la evolución.

El final de la fase material encuentra un paralelismo en la transición de la segunda fase (la biológica) a la tercera (la intelectual) (véase capítulo 20). Veremos entonces que este fenómeno vuelve a producirse a un nivel de mayor complejidad.

El agotamiento del caldo primario tiene una consecuencia mucho más profunda para las unidades biológicas: comienza una escasez mucho más grave que la que suponía la falta de los elementos básicos moleculares. Ahora han empezado a agotarse todas las reservas de energía acumuladas durante la fase de evolución de la materia. La vida, en su proliferación desenfrenada, parece haber engullido o agotado su propio sustento. Sin la existencia de moléculas ricas en energía la

autoduplicación parece haber llegado a su fin. ¿Cómo pudo continuar existiendo la vida?

En este momento nos encontramos en el punto en el que el camino se bifurca entre la zoología y la botánica. También el desarrollo de estructuras biológicas en otros planetas tiene que llegar, o haber llegado, a este mismo punto. En nuestro planeta se encuentran dos soluciones para salir de esa inevitable crisis energética: las plantas y —en segundo lugar— los animales. Muy probablemente en otros lugares del Universo las soluciones hayan sido las mismas.

Los organismos vegetales tienen la capacidad de realizar la fotosíntesis, es decir, de desarrollar un proceso en el cual aprovechan la energía de la luz solar para transformar las moléculas de dióxido de carbono y de agua en moléculas de azúcares, ricas en energía. En este proceso se produce oxígeno como «residuo». En general, el proceso puede quedar reflejado en la reacción química:

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O + \text{energía solar} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$$

En todas las células verdes de las plantas podemos encontrar ciertas estructuras denominadas «cloroplastos» que contienen la clorofila. Este pigmento verde de las hojas es capaz de absorber la luz solar y utilizar esta energía para impulsar las reacciones químicas que se producen en los cloroplastos.

La fotosíntesis constituye, por tanto, una nueva fuente de energía que hace posible que la vida vegetal se independice de la existencia de moléculas ricas en energía. Así pues, los vegetales pueden asimilar las pequeñas moléculas pobres en energía que hallan en su entorno —posteriormente, a lo largo de la evolución, esta asimilación se realizará a través de las raíces y las hojas— y producir por sí mismos —por medio de la fotosíntesis— las moléculas enriquecidas necesarias para su autoduplicación. En este proceso participan también toda una serie de enzimas con superficies estructurales muy complejas.

Este nuevo procedimiento para obtener energía conduce, a través de muchos millones de años, a una profunda transfor-

mación de la atmósfera de nuestro planeta. La concentración del producto residual, el oxígeno, comienza a elevarse poco a poco, haciendo posible la existencia de organismos vivos que respiran oxígeno.

Pero, de momento, la consecuencia más importante del proceso de la fotosíntesis es otra: el oxígeno y el ozono (O_3) —gas derivado del anterior a una altura superior a veinte kilómetros— impiden que penetren los rayos ultravioletas del sol, cuyo efecto destructivo había impedido hasta entonces que las células primarias pudieran existir en la superficie del agua o de la tierra. La vida, por tanto, produce por sí misma un escudo que deja pasar la luz solar, tan necesaria por ser rica en energía, y que impide el paso de la parte destructora de esa luz.

Volvamos de nuevo a la crisis energética. La primitiva planta unicelular fue la primera solución al dilema de la escasez. ¿Cómo se desarrolla después la segunda solución, la zoológica?

Los *organismos animales* cubren sus necesidades de energía y de elementos básicos para su reproducción engullendo otras unidades biológicas. Engullen plantas y también otros animales y los asimilan, descomponiéndolos en elementos moleculares para poder conservar la propia vida y reproducirse. Comienza un proceso de destrucción de estructuras para construir, con sus materiales y con la energía contenida en ellos, otras estructuras. Algo análogo ocurría en la fase de evolución de la materia cuando, mediante reacciones químicas, se desintegraban moléculas que formaban con sus constituyentes otras nuevas moléculas tal vez más complejas.

Los primeros animales —todavía unicelulares— tienen también que desarrollar mecanismos complejos que les permitan realizar la operación de «engullir» a otros organismos y, posteriormente, desintegrarlos. Uno de los problemas de este proceso es asegurar que la capacidad de desintegrar estructuras no afecte a partes del propio organismo. La dificultad de este proceso puede apreciarse si consideramos que incluso el ser humano se encuentra en apuros al desarrollarlo:

cuando existe una úlcera de estómago los propios jugos gástricos atacan la pared estomacal del individuo.

El principio de «vida que devora a otra vida», por sí solo, no hubiera tenido posibilidad de perdurar. Sólo combinado con la vida vegetal —capaz de captar la energía solar, transformarla y proporcionar materiales a otras estructuras biológicas— puede continuar existiendo. La fotosíntesis, como fuente inagotable de energía, es, por tanto, un factor fundamental para la continuación de la evolución. La aparición de los animales y de su necesidad de atrapar y devorar presas, con el consiguiente peligro de ser atrapado y engullido como presa, es una nueva presión selectiva que llega a convertirse en la fuerza motriz de todo desarrollo importante.

Sólo tendrán posibilidades de sobrevivir aquellas estructuras biológicas capaces de reproducirse al menos con la misma rapidez con que pueden ser devoradas por otras estructuras. Cuando mejor sepan protegerse los organismos de ser devorados y cuanto mejor dominen el proceso de la fotosíntesis o la habilidad de capturar a otros organismos, mayor será su posibilidad de sobrevivir.

Ya hemos llegado al nivel de organización en el que puede hablarse de organismos unicelulares. Atrás ha quedado una gran parte del proceso de evolución biológica que ha tenido lugar sobre nuestro planeta.

Desde que apareció la capacidad de autoduplicación es muy probable que se produjeran ciertas asociaciones de protobiontes. Este fenómeno parece haber sido muy importante para los amplios procesos metabólicos que tuvieron que desarrollarse. Es también muy probable que las células superiores actuales sean el resultado de la incorporación en determinadas estructuras de otros protobiontes en su origen independientes. Por ejemplo, los cloroplastos de las plantas —orgánulos celulares en los que se desarrolla la fotosíntesis— y las mitocondrias —orgánulos celulares encargados de transformar las moléculas portadoras de energía— están dotados de su propio ADN y de un mecanismo autóctono de síntesis de proteínas. De ahí que se sospeche que estas estructuras fueran en otros

tiempos unidades independientes que se asociaron simbióticamente con otras células convirtiéndose en orgánulos especializados en determinadas funciones. En este proceso perderían a cambio otras capacidades que fueron asumidas por otras partes de la célula anfitriona.

Así pues, debemos considerar estas asociaciones de protobiontes como otro proceso más de integración:

$$\bullet\bullet\bullet \int \text{protobiontes} \longrightarrow \text{célula}$$

Los organismos unicelulares que surgen a partir de esta integración son o plantas (es decir, organismos con capacidad para desarrollar la fotosíntesis), como las algas unicelulares, o animales (es decir, organismos que extraen la energía y los elementos constituyentes que necesitan para su reproducción de otros organismos vivos), como, por ejemplo, las amebas. Junto a estos dos grupos siguen existiendo todavía hoy otra clase de organismos unicelulares, las bacterias, que se «alimentan» de moléculas grandes, si bien estas moléculas ya no proceden de un «caldo original», sino de los residuos de animales o plantas muertos.

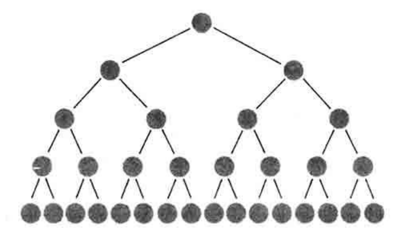
Para completar la idea de las características de los organismos unicelulares faltan aún dos cuestiones importantes: la sexualidad y la regulación. Estas dos cuestiones serán el tema de los dos capítulos siguientes.

12. EL PRIMER AMOR

«Toda la dinámica del cosmos surge del instinto de reproducción.»

FREDERICUS

La vida no es sino la reproducción de la información que ha demostrado su utilidad a través de la selección y la competencia; no es sino la autoduplicación de la estructura que llegó a configurarse a base de una larga serie de improbabilidades. De una célula surgen dos; de dos, cuatro; de éstas, ocho, y así sucesivamente. Este es el modelo original de toda reproducción: la *reproducción vegetativa*:



Según fue aumentando la complejidad de las unidades biológicas, tuvo que irse perfeccionando el proceso de autoduplicación. Sin una mejora en la exactitud, las células de las estructuras, cada vez más complejas, hubieran acabado produciendo sólo células inservibles, puesto que con cada autoduplicación uno u otro de los componentes estructurales —cada vez más numerosos— se haría defectuoso por alguna mutación. Las unidades estructurales capaces de autoduplicarse con más exactitud serían las que conseguirían tener más descendientes capaces de sobrevivir a la presión de la selección. Las estructuras que hubieran experimentado cierto grado de desarrollo, pero que siguieran autoduplicándose de modo deficiente, no conseguirían superar el filtro de la selección.

Sin embargo, el aumento en la exactitud de la autoduplicación, pese a ser necesario, también tenía aspectos negativos. Al reducirse el número de posibles alteraciones por mutaciones, es decir, al producirse réplicas menos defectuosas, disminuyeron también as posibilidades de perfeccionamiento y desarrollo. Con el aumento de la complejidad de las estructuras, la evolución tuvo que hacerse cada vez más lenta; cada vez fueron más raras las alteraciones que fomentaban el progreso de las estructuras. ¿Significa entonces que el desarrollo trae consigo un estancamiento?

La aparición de nuevas características comenzó a producirse sólo esporádicamente en una u otra familia de células. En los comienzos de la fase biológica, los progresos que realizaban estructuras individuales podían combinarse simplemente por fusión de sus portadoras. Pero a cada nueva fusión, las células aumentaban su tamaño aproximadamente al doble, y esto no sólo era innecesario sino que contribuía a hacer más difícil el proceso de autoduplicación: era necesario duplicar todos los componentes, fueran necesarios o no. La solución más práctica era, pues, unir ambas mejoras en una sola célula.

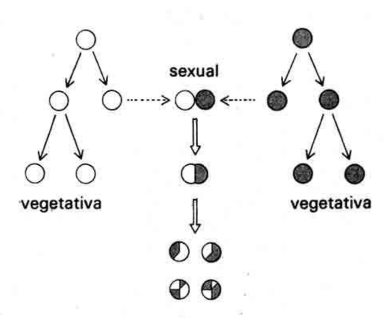
Ante esta necesidad surgió la *sexualidad*, es decir, el mecanismo que permite unir partes de la información genética (y, por tanto, *partes estructurales*) de una célula con partes de otra célula. La presión selectiva y el riesgo que corrían las estructuras si no conseguían ser suficientemente competitivas, ofrecía un incentivo tan alto a esta combinación de mejoras que las estructuras que lograron realizarla consiguieron triunfar sobre las demás.

El procedimiento más efectivo fue el que actualmente utilizan todas las plantas y animales superiores: la simple fusión de dos células que, tras mezclar su información genética, vuelven a dividirse, pero de modo que cada una de las células hijas obtiene un equipo completo con todas las estructuras parciales del ADN (recombinación de la información genética).

Poco a poco fueron desarrollándose células con superficies favorables a la fusión que, ocasionalmente, se unían a otras para mezclar su material genético y volver a dividirse,

en principio, de una forma bastante aleatoria. Posteriormente, a lo largo de la evolución, esta división siguió realizándose de forma aleatoria, aunque siempre con la condición de que al efectuarse la partición, cada una de las células resultantes estuviera dotada de una información genética completa.

De esta manera se dio la posibilidad de que las estructuras parciales más eficaces y favorables procedentes de dos linajes distintos, A y B, pudieran reunirse en *una* sola unidad estructural. Este proceso es lo que los biólogos denominan *reproducción sexual.* Como puede observarse en la siguiente representación esquemática, muchos organismos han seguido conservando hasta hoy el sistema de reproducción vegetativa (flecha →) junto al nuevo sistema de reproducción sexual (flecha doble ⇨):



Los organismos unicelulares, como, por ejemplo, las levaduras o los paramecios, se reproducen sobre todo por simple partición (reproducción vegetativa); sin embargo, pueden reproducirse también sexualmente, y lo hacen a veces. También hay muchas plantas superiores que, junto a su sistema de reproducción sexual, conservan la posibilidad de reproducirse de forma vegetativa (por ejemplo, mediante estolones). En cambio, los animales superiores —a los que dedicaremos próximamente nuestra atención— se reproducen siempre sexualmente, debido a las enormes ventajas que ofrece la reproducción sexual frente a la selección natural. La necesidad de encontrar una pareja sexual no supone ninguna desventaja debido a la movilidad de los animales.

El surgimiento de la sexualidad introduce un nuevo aspecto en la biología: hasta ahora sólo existía una enorme cantidad de unidades biológicas más o menos similares. No había unas fronteras rígidas. Todas ellas se reproducían de forma vegetativa, compitiendo unas con otras. Ahora, en cambio, se originan grupos sexuales, es decir, organismos vivos lo suficientemente semejantes como para poder emparejarse sexualmente de forma armónica.

En tomo a estos organismos capaces de reproducirse sexualmente puede establecerse una demarcación de grupo semejante a una integración. Como consecuencia de la formación de grupos o familias de organismos que sólo se mezclan entre sí, surgen comunidades cuyos miembros, debido al constante intercambio de su ADN, conservan su parecido a lo largo de muchísimas generaciones. La información genética de todos ellos se convierte en el *patrimonio genético común* de la «especie»; término con el que se denomina científicamente a los grupos vinculados por su sexualidad. Hasta ahora sólo se habían producido organismos individuales; ahora la sexualidad constituye el verdadero origen de las especies.

La especie en sí constituye un nuevo concepto de unidad, una nueva estructura gigante compuesta por elementos básicos similares, interrelacionados en un sistema. Queda bastante determinado quién pertenece a ese sistema y quién no, pero no existe una distribución espacial concreta de los elementos básicos.

Ya habíamos utilizado anteriormente el concepto de «estructura» en una generalización similar. Tampoco el interior de una célula es del todo rígido. Sus elementos básicos, o estructuras parciales, no están vinculados de un modo rígido entre sí. Lo que sí es importante es que la célula contenga una determinada cantidad de estas estructuras parciales que *cooperen* de forma armónica. La interdependencia de los elementos básicos es la característica esencial de las estructuras.

Así, en la distribución espacial interna de la célula se producen ciertas necesidades, es decir, limitaciones, pero, por otra parte, también existe cierto margen de libertad. Por

ejemplo, el número de estructuras parciales que se producen (como, por ejemplo, el número de enzimas) no es esencial; lo esencial es qué estructuras parciales se producen de modo vinculado. En sí, la célula —como la especie— es hasta cierto punto una estructura *semirrígida.*

Al empezar el presente capítulo hemos hablado de la necesidad de que las estructuras se autoduplicaran cada vez con mayor exactitud. En cada estadio de desarrollo se da una frecuencia óptima de mutaciones: ni tan alta como para permitir que se produzcan suficientes descendientes capaces de sobrevivir, ni tan baja como para que sea posible una evolución.

El surgimiento de grupos sexuales, es decir, de especies dentro de una gran masa de organismos, hizo descender sin duda esta frecuencia óptima de mutaciones en favor de una mayor exactitud en la autoduplicación. Los miembros de un determinado grupo sexual tienen que conservar su semejanza (para mantener la cohesión de la especie), pero, por otra parte, deja de existir la necesidad de producir nuevas facultades (A y B) de forma lineal dentro de un mismo linaje. La sexualidad permite ahora unir los logros conseguidos en diferentes líneas de reproducción vegetativa, en los descendientes que provienen de la reproducción sexual: las estructuras individuales ya no cuentan sólo consigo mismas para tratar de conseguir innovaciones favorables, sino que, a través de la sexualidad, pueden combinar sus propias conquistas con las de otros miembros de la especie.

La duplicación del ADN se produce con la ayuda de ciertos enzimas especializados en suministrar los correspondientes nucleótidos en el momento de la duplicación. Sólo ocasionalmente se produce algún error en este proceso. Sin embargo, los enzimas de la duplicación —como todos los demás— se encuentran codificados en un segmento del ADN y son producidos mediante los mecanismos de síntesis de proteínas.

Por tanto, cuando surge una mutación precisamente en el segmento en el que se halla codificado un enzima duplicante, el resultado será un enzima alterado que puede ser inadecuado

y dar lugar a un ADN también inadecuado. Una mutación de este tipo puede resultar letal para la célula, aunque también puede solamente dar lugar a una disminución de la exactitud en a autoduplicación o. excepcionalmente, contribuir a un aumento de dicha exactitud. En el primer caso se produciría un mayor número de mutaciones, mientras que en el segundo el número de mutaciones disminuiría.

La frecuencia de mutaciones depende, por tanto, de las alteraciones provocadas por dichas mutaciones. Esto hace posible que, a través de la selección, el número de errores que se producen en el proceso de autoduplicación pueda mantenerse en un nivel óptimo para el grado de desarrollo alcanzado. Es decir, que, mediante la alteración del grado de exactitud de la duplicación, puede elevarse o disminuirse la frecuencia de las mutaciones, dependiendo de lo que en ese estadio de desarrollo sea más beneficioso para la especie.

La capacidad de regular la frecuencia de mutaciones —que se basa también en otras observaciones realizadas por la biología molecular— quita fuerza a las especulaciones que pretenden demostrar que la frecuencia de las mutaciones es, o no es, suficiente para interpretar los avances de la evolución a lo largo del tiempo. El grado de exactitud en la reduplicación del ADN, es decir, el grado de estabilidad de la información genética de los organismos, no es en absoluto una constante de la naturaleza, sino una capacidad que puede ser regulada a través del mecanismo de la selección, adaptándose a las necesidades exigidas por cada situación.

Con esto nos hemos introducido en otro de los aspectos importantes de la evolución: la adaptación de las estructuras biológicas a su entorno.

13. NO HAY INTERIOR SIN EXTERIOR

«La vida consiste en una continua adaptación de las relaciones internas a las circunstancias externas.»

SPENCER

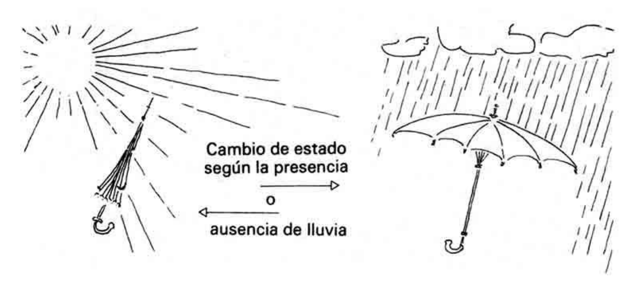
Cuando una célula no encuentra en su entorno un aminoácido necesario —por ejemplo, el triptófano— para poder autoduplicarse, se ve obligada a sintetizar esa molécula tan importante mediante sus propios enzimas. En cambio, si la célula vive en un entorno en el que encuentra suficiente triptófano, esa síntesis será superflua y constituirá un derroche innecesario de energía y elementos básicos que no contribuirá en absoluto a la reproducción de la célula.

Por tanto, una célula «ahorrativa» que sólo produzca sus enzimas en caso de necesidad, estaría en ventaja respecto a otras células «derrochadoras». Pero para economizar de esta manera, la célula precisaría un mecanismo que le permitiera analizar la oferta de elementos básicos de su entorno, para después producir o no determinados enzimas. Una *regulación enzimática* de este tipo resultaría muy beneficiosa para los procesos metabólicos de las células. Tal selección significaría además que no sería necesario descifrar más que aquellos genes (los segmentos del ADN que contuvieran la información necesaria para la síntesis de esos enzimas) que fueran necesarios en un momento dado para, posteriormente, convertirlos en cadenas proteicas.

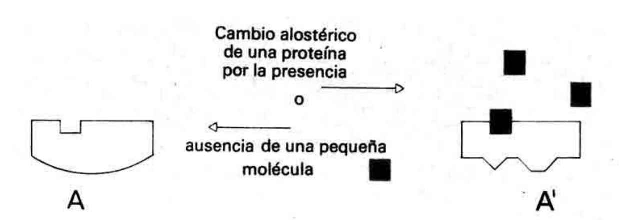
A primera vista, parece que una descodificación de los genes según las exigencias del medio ambiente requeriría una lógica que superaría la capacidad intuitiva de unas células desprovistas de cerebro. Sin embargo, resulta fascinante ver que, a pesar de la dificultad, las células realizan este tipo de regulación molecular. Pero para poder comprenderlo tenemos que adentrarnos un poco más en este campo.

Ya hemos resaltado en varias ocasiones la importancia que tienen las proteínas en todos los procesos vitales de los organismos. Sabemos que lo que hace imprescindibles a las proteínas es su ilimitada capacidad para formar superficies moleculares de todo tipo. Pero, por si fuera poco, las proteínas poseen además otra propiedad que las capacita para intervenir en ese proceso de regulación molecular que hemos comentada: el alosterismo.

Muchas proteínas funcionan, en cierto modo, como un paraguas: pueden tomar dos formas o configuraciones: abierta y cerrada.



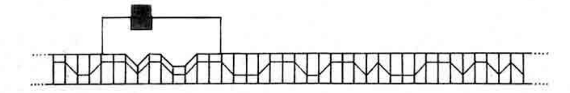
La forma que adoptan no es casual, sino que depende de la presencia o la ausencia de una determinada e insignificante molécula. Así, una proteína que carezca de esa pequeña molécula *a* adoptará la forma *A*, mientras que en presencia de la molécula *a* tomará la forma *A’*:



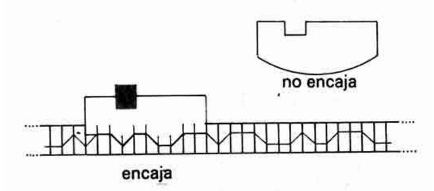
Lo mismo ocurrirá con otra proteína: en presencia de la pequeña molécula *b* adopta la forma *B’*, en su ausencia, la forma *B*.

El alosterismo de las proteínas es el mecanismo molecular que hace posible la regulación de los procesos vitales. A lo

largo de la evolución biológica llegaron a formarse proteínas cuyas estructuras moleculares se acoplan exactamente a determinados segmentos del ADN, es decir, a determinadas secuencias de nucleótidos, bloqueando de este modo la lectura del gen codificado en dicho segmento.



Una proteína de este tipo es alostérica: sólo gracias a la unión con una pequeña molécula que le es afín logra conseguir su superficie de acoplamiento al ADN. Sin esa pequeña molécula, la proteína no puede acoplarse al ADN, con lo que el segmento correspondiente queda libre para ser descodificado. Por tanto, los enzimas codificados en ese segmento del ADN sólo serán producidos cuando falte una insignificante aunque decisiva partícula.

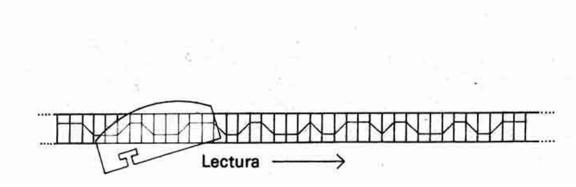


Con este mecanismo queda garantizada la regulación o selección de los genes. Volvamos a considerar ahora nuestro ejemplo del triptófano:

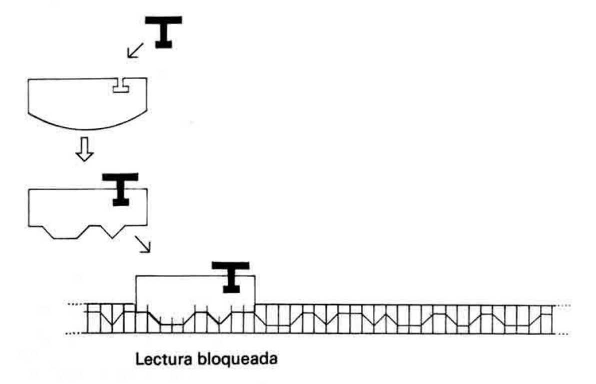
Existe un segmento determinado de ADN en el que se hallan codificados los enzimas necesarios para la síntesis del triptófano. En la célula hay además un tipo de proteína alostérica que tiene la capacidad de acoplarse exactamente a ese segmento del ADN; aunque sólo puede hacerlo cuando disponga de una molécula de triptófano. Sin la adición de esa molécula de triptófano, la proteína no podrá acoplarse al segmento del ADN.

Vemos, pues, que cuando en la célula escasea el triptófano, las proteínas alostéricas reguladoras del triptófano no podrán conseguir las moléculas de triptófano necesarias para

su función inhibidora, y no podrán acoplarse al segmento del ADN:



El resultado de esta escasez va a ser la descodificación de los genes, es decir, la producción de los enzimas necesarios para llevar a cabo la síntesis del triptófano. Sin embargo, si debido a la propia síntesis interna o a una posterior asimilación del exterior, el nivel de triptófano supera la cantidad necesaria, las proteínas reguladoras se unirán a moléculas de triptófano (T) y tomarán su forma, que les permitirá acoplarse al segmento del ADN.



El inmediato bloqueo del segmento del ADN impedirá que los genes que contiene puedan ser descodificados y, por tanto, inhibirá la síntesis del triptófano. Incluso si la pequeña molécula llega a desprenderse de la proteína reguladora —lo que haría que perdiera automáticamente su adhesión al ADN—, la proteína se uniría rápidamente a otra molécula de triptófano, y volvería a bloquear el ADN, siempre que existan suficientes moléculas de triptófano a disposición.

Naturalmente, existen mecanismos similares para la regulación de otros enzimas. Cada grupo de enzimas dispone de sus proteínas reguladoras específicas, dotadas de superficies especializadas en acoplarse a los segmentos correspondientes del ADN.

Pero ¿a qué clase de control están sometidos estos «controladores»? Todas las proteínas reguladoras se hallan a su vez codificadas en segmentos especiales del ADN. La célula produce sólo unos *pocos* ejemplares de cada tipo de estas proteínas. Con ellas, gracias al fenómeno del alosterismo y de las superficies de enlace, las células consiguen economizar al máximo el consumo de energía y de elementos básicos. De este modo la célula puede dedicarse a producir únicamente aquellas proteínas necesarias para su reproducción dependiendo de las circunstancias externas de cada momento.

¿Cómo han llegado a crearse estos mecanismos reguladores? Sin duda, del mismo modo en que llegaron a configurarse los enzimas necesarios para el metabolismo. Por azar, el organismo obtiene ciertas innovaciones ventajosas frente a la selección que, por tanto, son transmitidas a los descendientes. La inexactitud en la autoduplicación (es decir, las mutaciones) y la selección se encargarán después de perfeccionar esa capacidad reguladora que ha surgido por azar.

Así, de un modo consecutivo o no, la célula va adquiriendo la capacidad de regular cada vez más enzimas gracias a una misma propiedad: el alosterismo de ciertas proteínas. Sin esta extraordinaria propiedad de las proteínas reguladoras, que se desarrolla gracias a la intervención de una pequeña partícula y que provoca una alteración de su forma estructural, parece impensable que hubieran llegado a desarrollarse los organismos pluricelulares.

En este capítulo hemos llegado a ampliar bastante nuestro campo de visión. Hasta ahora habíamos considerado a las estructuras biológicas como entidades aisladas, limitando nuestras consideraciones a las relaciones internas de sus componentes estructurales. Habíamos visto también cómo, durante el transcurso de la evolución biológica, se fueron amplian-

do cada vez más las relaciones de interdependencia (ampliación de la configuración interna). Sin embargo, sólo muy ocasionalmente habíamos hecho alusión al medio externo en el que existían estas estructuras.

A partir de ahora el medio ambiente irá adquiriendo cada vez más importancia en nuestras consideraciones. La ampliación de las relaciones e interdependencias no está limitada sólo al espacio interno de los organismos, sino que va extendiéndose cada vez más a otras estructuras que se encuentran en el exterior. Las estructuras del exterior pronto se convierten en un factor de selección decisivo para la supervivencia de los organismos individuales. La configuración interna de la estructura biológica tendrá que estar en armonía con el mundo exterior que la rodea.

Los organismos no sólo adaptan su configuración a las moléculas que existan en su entorno, sino que tienen que adaptarse también a las condiciones físicas imperantes (temperatura, cantidad de luz, etc.). Desde el surgimiento de la sexualidad, la relación armoniosa con los congéneres del sexo opuesto desempeña también un papel importante, sin importar que consideremos esta relación como interna o externa. Pero, sobre todo en el mundo animal, las relaciones entre cazador y presa empiezan a cobrar cada vez mayor importancia por su repercusión sobre el desarrollo y la evolución de ambas categorías.

La totalidad del mundo material y, sobre todo, la totalidad del mundo biológico toman parte en el fenómeno de la selección. Por ejemplo, si una especie se especializa en devorar a otra, esta última, para sobrevivir, puede intentar trasladar su hábitat a otro lugar, alterar su estructura para lograr más rapidez en la huida o un mecanismo de intimidación, tratar de protegerse desarrollando una coraza que la haga invulnerable o un colorido que la camufle, etc. Para conseguir sobrevivir, la especie perseguida tendrá que producir muchos descendientes o conseguir alguna alteración que la favorezca. Si la especie acosada llega a conseguirlo, la especie cazadora tendrá que encontrar nuevos métodos para superar la crisis de alimentación que haya podido surgir de estos cambios. Sólo

llegará a conseguirse un equilibrio estable cuando los cazadores y sus presas estén en tal relación que los cazadores puedan encontrar nuevas presas sin llegar a exterminar a la especie perseguida.

En la última fase de la evolución biológica sobre todo, se va desarrollando una relación cada vez más estrecha entre los individuos y las estructuras que forman parte del mundo exterior. Se da, pues, una adaptación e interrelación cada vez mayor, de manera que la evolución de todos los organismos depende cada vez más del medio ambiente. Esto significa que hay una mayor interdependencia, una mayor interrelación entre lo interno y lo externo. Llega el momento en el que ninguna estructura biológica puede desarrollarse «independientemente». Esto es precisamente lo que nos dice la célebre expresión de Darwin: *«Survival of the fittest»*, sólo conseguirán sobrevivir los organismos mejor adaptados.

Está claro que la lucha es parte de este proceso de evolución. Pero nunca llega a establecerse un equilibrio final. Incluso si no se produjeran alteraciones geológicas en el planeta (como el surgimiento de montañas, los cambios climáticos, o los desplazamientos de los continentes, que unen o separan a diferentes especies), el conjunto de especies biológicas nunca encontraría un equilibrio estable. Una y otra vez se producirían mutaciones que traerían como consecuencia una alteración de las condiciones de la selección natural y que, por tanto, provocarían una reacción en cadena de alteraciones.

Si cambia el medio ambiente, tendremos que adaptarnos para sobrevivir; pero el cambio adaptativo provocará nuevos problemas en otros organismos, y creará condiciones de selección. La inexactitud en la reproducción y los cambios geológicos y climáticos constituyen la fuerza motriz que impulsa el continuo desarrollo de los seres vivos: y hay que tener en cuenta que desarrollo significa un aumento de la información genética. Una y otra vez hay que superar nuevos problemas y desarrollar nuevas capacidades, lo que, por lo general, se consigue mediante una ampliación de la estructura existente. Sin esa ampliación funcional y estructural, la especie quedaría condenada, más pronto o más tarde, a la desapa-

rición. Volveremos a encontrar este mismo principio en la fase intelectual de la evolución.

14. DE LA CELULA AISLADA A LOS ORGANISMOS MULTICELULARES

> «...requiere que sus partes se unan convirtiéndose en una totalidad, que sean recíprocamente causa y efecto de su propia forma.»
>
> KANT

Los organismos unicelulares consiguieron, a lo largo de la evolución, aumentar y perfeccionar considerablemente el contenido de información de su ADN, lo que les permitió realizar grandes progresos. En este capítulo estudiaremos un nuevo avance de la célula que va a determinar la dirección de toda la evolución posterior: a integración de células hermanas.

• • • $\int$ células → organismos pluricelulares

Ya hemos visto cómo se inicia esta desintegración: su desarrollo comienza con la aparición de mutaciones que alteran la superficie celular de modo que las células permanecen unidas después de dividirse. Así se constituyen aglomerados celulares que resultan ser más ventajosos que la célula aislada, por ejemplo, por su mayor protección contra el peligro de deshidratación o de ser devoradas por otros organismos cazadores.

Sólo en el momento de la autoduplicación, algunas células individuales tienen que separarse del aglomerado para, por división, formar nuevos aglomerados. La reproducción sigue, por tanto, como hasta entonces. La novedad consiste en que las células de estos aglomerados viven en contacto directo con otras células genéticamente iguales, lo que significa una ampliación de la estructura.

La formación de comunidades de células permite establecer una división del trabajo. Algunas células se especializan en la movilidad del grupo, otras en la alimentación, etc. Ya no es necesario que *cada una* de las células sea capaz de desarrollar *todas* las funciones. Cada célula individual puede limitarse a desarrollar unas cuantas funciones para realizarlas de un modo más eficaz. Las posibilidades de supervivencia de uno de estos aglomerados se potencian a medida que sus componentes son capaces de organizarse y constituir una sola unidad, es decir, de desarrollar una serie de interrelaciones entre sus diferentes partes. Esto permitirá, como ya hemos dicho, que cada célula o grupo de células se especialice en desempeñar determinadas funciones, lo que favorecerá la capacidad de supervivencia de toda la entidad.

La organización para la división del trabajo en el seno de una asociación de este tipo exige que las células individuales sacrifiquen su necesidad reproductora en bien del aglomerado. Sólo mediante una restricción de la división celular resulta posible llegar a una distribución armónica del trabajo. Sin esta restricción, cualquier intento de organización desembocaría en un caos. La actual necesidad de limitar la población humana en el planeta presenta ciertos paralelismos con la situación en la que se encontraron las células.

Hasta entonces cada célula tenía una sola meta en su existencia: producir con la máxima rapidez el mayor número posible de descendientes. El surgimiento de la sexualidad no había cambiado en nada esta meta. Sólo conseguían sobrevivir aquellas especies capaces de reproducirse desenfrenadamente. La aglomeración de células para constituir organismos pluricelulares trae consigo un cambio drástico en la situación. Se hace necesario renunciar al sentido que hasta entonces había tenido la existencia individual. Para que la comunidad pueda sobrevivir y reproducirse, la armonía interna de la célula tiene que ampliarse a todas las partes que componen el aglomerado. La célula individual tiene que dejar de considerar a sus vecinas como competidoras y aceptarlas como aliadas que comparten la meta común de producir nuevos aglomerados celulares.

El paso de un «yo genético» a un «nosotros genético» que tuvieron que dar las células fue sin duda un proceso muy largo.

Tuvieron que surgir nuevos mecanismos reguladores capaces de controlar la autoduplicación de las células. En cuanto el aglomerado hubiera llegado a un tamaño adecuado, en cuanto hubiera suficientes células para encargarse de desempeñar las diferentes funciones especializadas, el aglomerado tenía que dejar de crecer.

La proliferación de organismos pluricelulares de todo tipo demuestra que, efectivamente, se llegó a producir este cambio; o, al menos, que se llegó a dar casi por completo. Incluso en la actualidad, los organismos pluricelulares no han conseguido renunciar del todo a su pasado. Entre los miles de millones de células que componen los organismos pluricelulares que hoy existen, de vez en cuando se producen de nuevo células que vuelven a recaer en su primitiva existencia egoísta y que, rompiendo el control del sistema al que pertenecen, emprenden una autoduplicación desenfrenada. Esto viene a demostrar que la capacidad de autoduplicación no se ha perdido, sino que ha sido inhibida por los mecanismos de control. A este tipo de células «egoístas» pertenecen las células cancerosas. Su regresión las convierte en «delincuentes», ya que su proliferación incontrolada destruye la armonía celular del organismo.

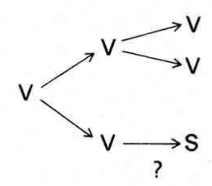
Así pues desde la perspectiva del proceso que originó los organismos pluricelulares, no debería resultarnos extraño que se produzcan células cancerosas; lo asombroso es más bien lo raramente que se dan estas infracciones contra las medidas de seguridad desarrolladas por los organismos pluricelulares más evolucionados. (Aparte de los controles genéticos inherentes a cada célula, los animales vertebrados disponen de la protección que supone su sistema inmunitario, que, por decirlo de alguna manera, desarrolla una labor «policial» en el Estado pluricelular, puesto que tiene capacidad para someter a una célula cancerosa que intenta rebelarse.) Desde esta perspectiva podemos comprender también que no existe sólo *un* cáncer, sino diferentes tipos de cáncer, según el tipo de célula

que se rebele y altere, y según los fallos que haya experimentado el mecanismo de control celular interno.

Los organismos pluricelulares necesitaron, por tanto, nuevos mecanismos para controlar la tendencia a la división celular desenfrenada. Sólo gracias a estos mecanismos resultó posible establecer nuevas interrelaciones y delegar en ciertos grupos de células determinadas funciones especializadas; sólo mediante la institución de estos mecanismos de control llegaría a ser posible la progresiva autoorganización del organismo pluricelular.

Pero ¿cómo fue posible que células descendientes de una misma célula madre pudieran estar destinadas a desempeñar funciones diferentes de acuerdo a un plan que no dependía del azar? ¿Cómo pudo ampliarse el programa genético de la célula, de modo que células inicialmente iguales pudieran desarrollarse de forma diferente? La respuesta a estas preguntas es la clave de toda «diferenciación», proceso que puede observarse tanto en el desarrollo de una planta como en el desarrollo embrionario de un animal.

Para explicar este fenómeno vamos a considerar primero los cambios provisionales de funciones que se producen en los organismos unicelulares. Las levaduras o los paramecios, por ejemplo, cuando realizan la reproducción sexual atraviesan diferentes estadios funcionales que se suceden en una serie de fases programadas.



Nuestra pregunta es la siguiente: ¿Cómo una célula que se halla en continua división vegetativa puede pasar de este estado vegetativo asexual «V» a un estado sexualmente activo «S»?

En el capítulo anterior vimos cómo se regulaba la descodificación de los genes mediante ciertas pequeñas moléculas y su interacción con las proteínas alostéricas. Cuando la célula recibe del exterior una nueva molécula, o cuando se interrumpe el suministro de una molécula abundante hasta entonces, el proceso de descodificación de los genes puede alterarse. Pueden quedar bloqueados otros genes, o entrar en acción genes que hasta entonces habían estado inhibidos. El medio ambiente que rodea a la célula ejerce, pues, una influencia sobre su funcionamiento interno.

Pero también cuando se dan ciertas condiciones internas, la célula puede experimentar ciertos cambios. Por ejemplo, la acumulación o el agotamiento de una molécula determinada puede poner en marcha o bloquear la descodificación de determinados genes. Dicha molécula puede, por tanto, desempeñar el de un reloj para la célula. Si en un proceso de este tipo se pone en marcha un nuevo reloj molecular, puede que al cabo de cierto tiempo se produzca una nueva alteración en la «lectura» de los genes de la célula. De esta forma puede llegarse a establecer cierta secuencia de lecturas genéticas: un programa cronológico del funcionamiento interno de la célula, siempre obedeciendo a las órdenes dictadas por la información genética. A lo largo de la evolución han ido estableciéndose una serie de beneficiosos *programas cronológicos* de este tipo, así como otros mecanismos reguladores que hacen que las células realicen sus funciones con la máxima economía.

La diferenciación de un organismo multicelular depende también de muchos de estos programas cronológicos que afectan a diferentes células; pero además existe un *programa de distribución espacial*. ¿Cómo puede desarrollarse un programa temporoespacial después de producirse la fusión de dos células reproductoras? ¿Se conocen los fundamentos básicos de este proceso?

La diferenciación de las células de un embrión, es decir, la especialización celular, no conlleva en absoluto una alteración de la información genética. Tanto antes como después de dicha diferenciación, el ADN de todas las células conserva la

misma estructura: la estructura del ADN de las células reproductoras originales, que irá transmitiéndose de generación en generación. Lo que ocurre es que, de ese ADN común, se descodifican diferentes genes, lo que da lugar a la producción de diferentes proteínas. El libro de cocina y los cocineros siguen siendo los mismos: lo que realmente cambia son los «menús». Pero ¿cómo pueden programarse de antemano las diferencias de distribución espacial dentro del aglomerado celular que compone el organismo?

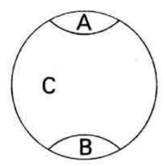
Algunas de las causas iniciales resultan bastante comprensibles: por ejemplo, está claro que las células externas de un aglomerado celular tendrán otras características y funciones (alimentación, captura de moléculas del medio, etc.) que las células del interior. Además, la célula fecundada, que, por sucesivas divisiones, dará lugar a un nuevo aglomerado, proviene de un conjunto celular espacialmente diferenciado que, posiblemente, ya en el interior de la célula óvulo, haya producido cierta asimetría (por ejemplo, una diferencia entre «arriba» y «abajo»). Esta asimetría interna se reflejará, después de la primera división, en una diferenciación de las células hijas. Las diferencias pueden materializarse, por ejemplo, en la presencia o ausencia de determinadas moléculas decisivas para la descodificación de determinados genes.

Éstas son algunas de las razones que explican una diferenciación espacial. De esta necesidad de diferenciarse espacialmente puede desarrollarse la organización final de las funciones de las células. El factor esencial es la «comunicación» entre las células a través de una serie de señales. Para ello existen moléculas específicas que son emitidas por determinadas células para que intervengan en el control de la activación genética de otras células, y también ciertas proteínas de «señalización» que determinadas células despliegan en el exterior de sus membranas.

Si un conjunto de células que realizan cierto proceso de descodificación —estadio que podemos denominar A— se encuentra con la necesidad de que algunas células pasen a un nuevo proceso de descodificación —B—, el paso puede producirse bien mediante un reloj interno, o bien mediante la

influencia de señales externas. Pero, puesto que todas las células A son iguales, el cambio que resulta necesario se producirá, más pronto o más tarde, en *todas* las células A; lo que evidentemente impediría que se diera la necesaria diferenciación entre células A y células B. Para que sólo algunas células A pasen al estadio B. es necesario que las primeras células que alcancen este estadio B emitan inmediatamente una señal que impida que el resto de las células A pasen al estadio B. El mensaje. «Aquí ya hay células B», por decirlo de algún modo, inhibe el cambio en el resto de las células A. que seguirán en su estado inicial.

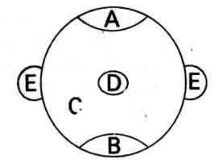
Vamos a tratar de explicar este proceso de diferenciación mediante un esquema. Para ello partiremos de un conjunto de células con una asimetría inicial «abajo-arriba», en la que hay células en tres estadios diferentes de lectura de genes: tipo A = arriba, tipo B = abajo y tipo C = el resto.

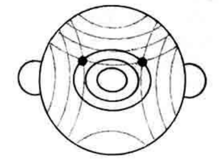


El tipo A y el tipo B emiten diferentes moléculas-señalizadoras que donde se juntan (imaginemos que es en el centro del conjunto) desencadenan una nueva lectura genética (el estadio D). Las células D emiten, a su vez, una molécula inhibidora que impide que las dos primeras señales puedan afectar a otras células. De este modo, la activación genética D queda limitada a las células que se hallan en el centro del conjunto.

Impulsadas por su programa cronológico, tanto las células A como las células B comienzan a producir a continuación otras moléculas que también son emitidas como señales. Pero esta vez son las células que configuran el exterior de la estructura las que reaccionan a estas señales. Por la confluencia de las señales emitidas por las células A y B, un grupo de células inicia una nueva actividad genética E que da lugar a

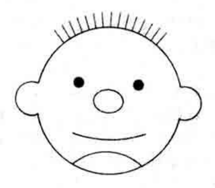
una rápida división celular y a la formación de protuberancias.





A continuación, las células del tipo A (arriba) y las de los nuevos tipos D y E emiten tres ciases distintas de molécula-señal. Las células que sean las primeras en captar las tres señales pasarán inmediatamente a otra activación genética.

Esto sucede en dos lugares del conjunto. Mediante una buena coordinación de otras señales emitidas desde el centro y desde abajo, se produce una nueva actividad genética que da lugar a una franja de células situada entre la «nariz» y la «barbilla». Por último, todas las células externas del tipo A comienzan a desarrollar pelos.



Aunque hasta el momento los biólogos sólo han llegado a analizar parte de este proceso en los organismos, el principio de la distribución espacial de las estructuras mediante la activación genética puede considerarse explicable, siempre que se tenga bien presente que todavía no se ha llegado a comprender la complejidad que supone, por ejemplo, la configuración celular que da lugar a diferentes tipos de narices.

En cualquier caso, la diferenciación, es decir, la configuración espacial y temporal de una estructura, se produce a través de actividades genéticas coordinadas mediante la transmisión de señales entre los diferentes sectores estructurales del conjunto. Las señales moleculares pueden recorrer

pequeñas distancias (milimétricas) por difusión (aprovechando el calor como medio de transporte multidireccional). Cuando se trata de grandes distancias las moléculas tienen que servirse de alguna corriente como medio de transporte. En los animales superiores el medio es la corriente sanguínea.

Pero no sólo se envían moléculas. A veces, ya durante la fase embrionaria, algunas células emprenden el viaje. Estas células se generan en un sector determinado gracias a la actividad de ciertos genes. En su superficie llevan unas moléculas específicas: la «dirección» que permite que estas células errantes lleguen a un lugar concreto de la estructura embrionaria, donde se unen a otras células residentes en dicho sector que presentan una superficie adecuada para la unión. Una vez afincadas, las células viajeras pueden impulsar, mediante su especial actividad genética, la diferenciación local de su nuevo lugar de residencia.

En general podemos decir que la diferenciación celular es un fenómeno por el cual, a partir de un programa genético común a todas las células y con la ayuda de un sistema complejo de regulación a través de señales moleculares, se produce la descodificación de *determinados* genes en *determinado* momento y en *determinadas* células.

Puesto que el ADN es el registro de información genética para la elaboración de todas las proteínas que intervienen en el programa regulador, es evidente que, en el proceso de evolución de los organismos unicelulares a los organismos pluricelulares, la cantidad de ADN por célula tiene que haber aumentado considerablemente. En efecto, la célula de una mosca, por ejemplo, contiene 50 veces más ADN que una bacteria, y una célula de un mamífero unas 2.000 veces más. La mayor parte de este nuevo ADN cumple «funciones administrativas», por así decirlo; es decir, funciones reguladoras en el proceso de desarrollo del embrión. Al aumentar la complejidad aumenta desproporcionadamente el aparato administrativo. Un organismo pluricelular como el hombre (10^{13} a 10^{14} células) está compuesto por cientos de tipos diferentes de

células. Y cada tipo requiere un departamento administrativo específico en el ADN.

Podríamos preguntarnos cómo pudo llegar a producirse tal sistema de mecanismos reguladores con sus complejas señales moleculares, cuyo objeto es garantizar el desarrollo armonioso del organismo pluricelular.

En el reino animal, *el óvulo fecundado* (o célula huevo) se convierte en el punto de partida general para el desarrollo de un nuevo organismo pluricelular. Esta estructura relativamente pequeña *contiene toda la información* necesaria para el desarrollo de la comparativamente gigantesca estructura del organismo pluricelular. Todo el desarrollo estructural del embrión no es más que el efecto específico de la estructura de la célula huevo. (Naturalmente, también existen ciertas exigencias de ayuda del exterior, como, por ejemplo, la alimentación del embrión en el útero o en la yema del huevo.) El organismo pluricelular no es más que la consecuencia del desarrollo de la estructura original del huevo.

Al contrario que en la evolución de los organismos unicelulares, que, como hemos visto, se desarrolla con una libertad autorrestringida y según los principios de formación de estructuras (con intervención del azar), el desarrollo de los organismos pluricelulares a partir del embrión está completamente determinado por la estructura de la célula huevo. Prácticamente ya no existe ningún grado de libertad.

La evolución de los organismos pluricelulares sólo puede producirse ahora a través de las quitaciones. Cualquier alteración de la estructura de la célula huevo conduce al desarrollo de un organismo alterado; la selección se encargará de decidir si este organismo es apto o no para la vida. El control de la selección se produce a dos niveles distintos. Por una parte, en el propio desarrollo embrionario se pone a prueba la armonía interna del sistema que regula el proceso de diferenciación. Si la interrelación no es armónica se producirán malformaciones que, en la mayor parte de los casos, acabarán con la vida del embrión.

Si, a pesar de las mutaciones, se desarrolla un organismo ligeramente alterado, será puesto a prueba en el proceso de

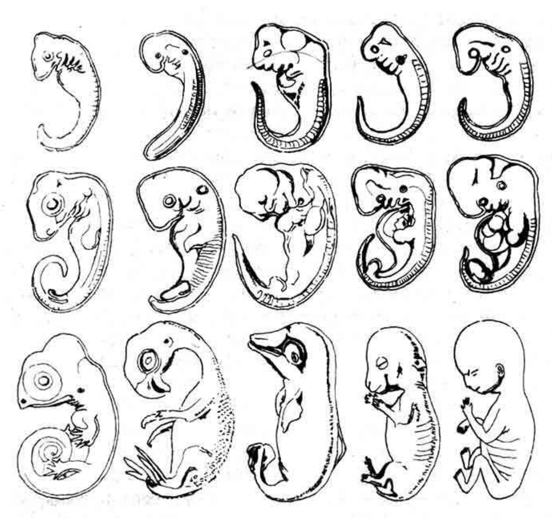
adaptación al medio ambiente exterior. Sólo si la mutación consigue superar este doble control tendrá la oportunidad de transmitir su información genética alterada a sus descendientes.

Es fácil imaginar que el número de intentos fallidos tuvo que ser enorme. Al igual que el proceso de desarrollo de las funciones metabólicas o de la división celular, la programación espaciotemporal del embrión sólo pudo lograrse de un modo gradual, y sólo gradualmente pudo irse perfeccionando. A cada mejora conseguida seguiría una enorme proliferación de los organismos portadores de ella. Estos organismos tendrían, a su vez, la oportunidad de lograr, por azar, un nuevo perfeccionamiento de su estructura. Alguno de ellos lo conseguiría más pronto o más tarde, y sus descendientes volverían a proliferar desplazando a otros organismos menos evolucionados.

Pero a lo largo de este proceso evolutivo siempre permanecería en el trasfondo el programa de diferenciación que ya había demostrado su eficacia, contra el que tendrían que compararse todas las nuevas alteraciones. La mutación tendrá que alterar o complementar el programa hasta entonces vigente de forma equilibrada. Esta limitación impide que puedan producirse alteraciones profundas del programa regulador, a la vez que hace que las mutaciones que lleguen a tener éxito contribuyan a una continua evolución de los organismos. Con el transcurso de la evolución, el programa irá ampliándose y sofisticándose cada vez más. A esto se debe que los primeros estadios del desarrollo embrionario de los animales superiores sean tan parecidos a los de sus antepasados.

Así, los reptiles, aves y mamíferos, por ejemplo, a pesar de las evidentes diferencias que presentan, conservan la armonía básica de una información genética común a todos ellos. En realidad, durante la fase embrionaria son sólo sutiles diferencias las que determinan que el desarrollo del embrión conduzca a tan diferentes resultados. Esto se hace patente al comparar las primeras fases del desarrollo embrionario de los vertebrados. Al lego en la materia puede resultarle casi imposible distinguir el embrión humano en sus primeros estadios

de desarrollo (hilera superior) de los embriones de reptil o ave. Incluso después de algunas semanas de gestación (hilera central), el embrión humano sólo se diferencia del de otros mamíferos por un mayor desarrollo de la cavidad cerebral.



(Según Haeckel)

Pero estas cuestiones entran ya en la problemática del origen de las especies, que será el tema del siguiente capítulo. En este capítulo hemos tratado de explicar cómo el ADN de los organismos pluricelulares ha ido ampliándose y complementándose paso a paso con segmentos que tienen codificado un complejo programa regulador que permite a las células emitir, recibir y asimilar señales moleculares. Este sistema de señales vincula entre sí a todas las células del organismo pluricelular; una unidad gigantesca con innumerables interdependencias y relaciones entre sus componentes.

Hemos vislumbrado el largo camino que tuvo que recorrerse desde el momento en que las primeras superficies celulares se alteraron de modo que los organismos unicelulares recién divididos permanecieron unidos entre sí, hasta que al fin se formaron organismos pluricelulares con una configura-

ción interna armónica. Y ahora surge la pregunta: ¿era inevitable que los primeros aglomerados celulares se convirtieran automáticamente en organismos pluricelulares altamente organizados? Parece ser que sí, puesto que el «invento» de organismos pluricelulares se realizó más de una vez y de forma independiente: en el reino animal y en el reino vegetal.

15. EL CUERNO DE LA ABUNDANCIA DE LAS ESPECIES

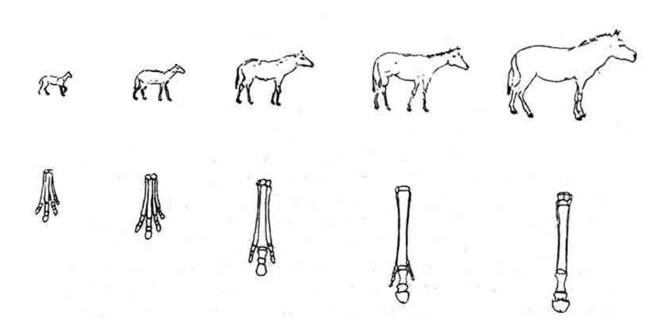
> «Para poder disfrutar de las formas superiores especiales y de los fenómenos de la naturaleza, tan laboriosamente investigados, hay que prescindir de los detalles —una vez se ha reconocido su importancia— y pasar a un nivel de comprensión más elevado.»
>
> A. VON HUMBOLDT

La información genética de los organismos pluricelulares se ha convertido en una sinfonía. En ella está codificado el programa de secuencias y distribución espacial de las diversas actividades de los músicos; es decir, de cada grupo de células. La armonía reina, no sólo en la secuencia de sonidos de cada instrumento individual, sino en toda la orquesta. Se trata de una unidad orgánica, unida por un sistema de interrelaciones cuya finalidad es lograr que el embrión se desarrolle siguiendo una secuencia determinada de ampliaciones estructurales.

Todos los miembros de una misma especie llevan las mismas instrucciones en su patrimonio genético. Sólo están permitidas pequeñas variaciones (mediante las mutaciones). Cualquier alteración profunda supone la interrupción de la sinfonía (malformaciones) y es eliminada por la selección natural. Las mutaciones del programa espaciotemporal sólo logran implantarse muy lentamente, incluso cuando contribuyen a aumentar las posibilidades de vida de la especie. La sexualidad mezcla continuamente el patrimonio genético de los miembros de una misma especie, de forma que, en última instancia, es toda la especie la que se beneficia de los posibles avances.

Es frecuente que se produzca un desarrollo lineal de la especie en determinada dirección (en largos períodos de tiempo y a través de un gran número de pequeñas mutaciones). Un

caso conocido de este tipo de desarrollo es la evolución del caballo: su aumento de tamaño y la formación de su casco han sido reconstruidos desde hace 60 millones de años hasta la actualidad:



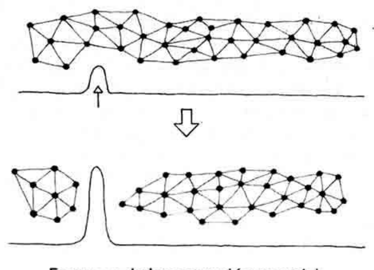
Cuando una especie ha logrado adaptarse armoniosamente al entorno es bastante difícil que se produzcan cambios bruscos, puesto que las posibilidades de mejora son escasas. Sin embargo, la situación puede cambiar a consecuencia de una alteración del medio ambiente (por ejemplo, por cambios climatológicos, o por la aparición de un nuevo depredador), con lo que se crean nuevos factores de selección. La especie, hasta entonces bien adaptada, tiene que enfrentarse a nuevas dificultades. Ahora es cuando cobran una importancia crucial mutaciones que hasta entonces no habían tenido utilidad: son la única posibilidad de alterar la especie de forma que pueda volver a integrarse armoniosamente en el medio ambiente.

Cuando decimos que una especie «se ha adaptado» podría parecer que la especie se ha esforzado activamente por alcanzar una determinada meta. La realidad es que las mutaciones provocan cambios en todas las direcciones posibles y que, posteriormente, la selección favorece sólo aquellos cambios que conducen a una mejor adaptación (filtración de los frutos del azar).] La adaptación incumbe a *toda* la especie. Puesto que todos los miembros de la especie están vinculados por la sexualidad, no puede darse el caso de que unos cuantos individuos decidan seguir su propio camino. Las mutaciones se propagan por toda la población. El destino común de la espe-

cie es algo mucho más profundo de lo que podemos imaginar al observar a un solo halcón o a una sola mariposa. La especie se ha convertido en una unidad real, aunque pueda dar la impresión de que sus miembros llevan una vida independiente.

Entonces, si una especie no puede dividirse en diferentes especies, ni siquiera bajo la influencia de los cambios del medio ambiente, ¿cómo se explica la notoria diversidad de especies que pueblan nuestro planeta? ¿Cómo puede convertirse una especie en dos especies?

La condición indispensable para que ocurra este fenómeno es la separación geográfica de la especie en poblaciones parciales, es decir, la división de la especie en grupos aislados. Este proceso presenta ciertas similitudes con el proceso de separación de los primeros aglomerados vivos de nuestro caldo L. primario. La separación podía ser provocada por la influencia del medio ambiente o por la imperfección del sistema de reproducción de los primeros organismos pluricelulares. En cualquier caso, aunque las células de estos organismos estaban interrelacionadas entre sí, su escasa diferenciación hacía posible la escisión sin perjuicio para el conjunto total.



Esquema de la separación espacial de una especie

Son varias las causas que pueden provocar la división de una especie: dado que la vida se desarrolló primitivamente en las aguas superficiales (irradiación solar, fotosíntesis), la diferencia de profundidades en las costas puede dar lugar a la formación de diferentes hábitats. Más adelante, ya en tierra

firme, el surgimiento de nueves macizos montañosos o la separación de los continentes pudieron ser causa de la formación de las diferentes especies de animales y plantas. Por ejemplo, pudo ocurrir que una bandada de pájaros, empujada por vientos huracanados, llegara a una isla hasta entonces deshabitada, quedando allí separada del resto de la especie.

La división de una población va unida generalmente a un cambio de las condiciones ambientales. Esto supone también un cambio en las condiciones de selección, que tendrá un efecto diferente sobre cada una de las poblaciones parciales. Tras la separación, debido al carácter fortuito de las mutaciones, cada uno de los grupos podrá —y de hecho deberá— seguir un camino diferente en su lenta pero continua evolución, incluso cuando las condiciones de selección no se hayan alterado. Esto será más fácil cuanto más *pequeño* sea el grupo escindido, puesto que las mutaciones existentes, o las que se produzcan después de la escisión, tendrán una repercusión mucho más rápida sobre los descendientes de un grupo reducido. Un grupo pequeño procedente de una escisión tiene que practicar necesariamente el incesto, y es más fácilmente transformable que una población numerosa. Además —y esto es muy importante— en poblaciones parciales reducidas, por azar, pueden establecerse mutaciones que no supongan ninguna ventaja frente a la selección (fenómeno que es denominado por los biólogos como *deriva génica*). Sin embargo, esto no resulta posible en las grandes poblaciones.

Naturalmente, los grupos pequeños corren mayor peligro de extinción. Sólo algunos grupos de los muchos que se han escindido logran sobrevivir y desarrollarse hasta constituir de nuevo una población estable. Al igual que las mutaciones son en gran parte eliminadas por la selección, y sólo rara vez llegan a alterar positivamente a los organismos, también a nivel de colectividad la mayoría de los intentos de escisión fracasan, y el grupo escindido sucumbe con relativa rapidez. Sólo en algunas ocasiones, gracias al azar —o, mejor dicho, a un conjunto de circunstancias fortuitas— el grupo escindido consigue sobrevivir y seguir evolucionando. A estas circunstancias fortuitas pertenecen tanto las condiciones ambientales

alteradas, como las mutaciones ya existentes o producidas en el grupo después de la escisión. Así pues, se dan numerosos intentos «a ciegas» en diferentes direcciones, y sólo algunas veces se llega a conseguir una relación armónica entre las estructuras internas y externas.

Sin embargo, la separación geográfica y la concurrencia de una serie de circunstancias afortunadas que permitan sobrevivir al grupo escindido no bastan por sí solas para formar una nueva especie. En algún momento, ya sea por una gran proliferación de sus miembros o por una nueva alteración geográfica, las poblaciones separadas volverán a coincidir en un terreno común. Este será el momento de la prueba final. ¿Entrarán los miembros de los grupos separados en contacto sexual y podrán tener descendientes como antaño, o su desarrollo habrá sido tan divergente que ya no podrán restablecerse los antiguos vínculos?

Hay muchas causas que pueden impedir el restablecimiento de esos antiguos vínculos y que, definitivamente, determinan la separación de las poblaciones; desde la imposibilidad material de efectuar la cópula (por ejemplo, debido a la diferencia de tamaño), hasta la desaparición de la armonía entre las células reproductoras. En los niveles superiores del reino animal puede darse también el caso de que los rituales de cortejo se hayan hecho tan diferentes que impidan aceptar como pareja sexual a un miembro del otro grupo.

Cuando ya no puede restablecerse la antigua comunidad por medio de la sexualidad y las poblaciones parciales pueden vivir en un mismo hábitat sin mezclarse, podemos afirmar que ha surgido una *nueva especie*. (Sin embargo, también es verdad que a veces no llega a producirse el reencuentro de las poblaciones parciales, con lo que la definición de especie no queda tan clara. Entonces, ¿qué criterio puede aplicarse cuando dos poblaciones no comparten el mismo hábitat, o no viven en la misma época? Los leones y los tigres, por ejemplo, se consideran dos especies distintas, a pesar de que pueden aparearse sin ninguna dificultad.)

Cuando pueden restablecerse los antiguos vínculos sexuales, las poblaciones parciales volverán a fundirse. En este

caso puede darse un extraordinario desarrollo ulterior de la especie, puesto que pueden combinarse los genes portadores de mejoras que las dos poblaciones hayan conseguido independientemente. Al igual que en los comienzos de la sexualidad, la combinación de genes responsables de diferentes funciones proporcionó un fuerte impulso a la evolución; ahora la reunificación de dos poblaciones parciales tras un largo período de separación puede tener como consecuencia un gran salto evolutivo de la especie. En la fusión de subespecies separadas que conservan aún la posibilidad de cruzarse es donde encontramos el mayor potencial evolutivo. Sólo de esta forma existe la posibilidad de que puedan combinarse, *al mismo tiempo* y de diferentes modos, alteraciones genéticas de eficacia ya demostrada, y que dichas combinaciones sean presentadas directamente a la selección natural.

El proceso de separación y reunificación de grupos escindidos de una misma especie puede ser considerado como un «acto sexual» a nivel de colectividad. Podríamos denominarlo «episexualidad», puesto que es un proceso de unión y recombinación de facultades nuevas y más desarrolladas, pero no a nivel individual, sino entre dos poblaciones parciales de una misma especie.

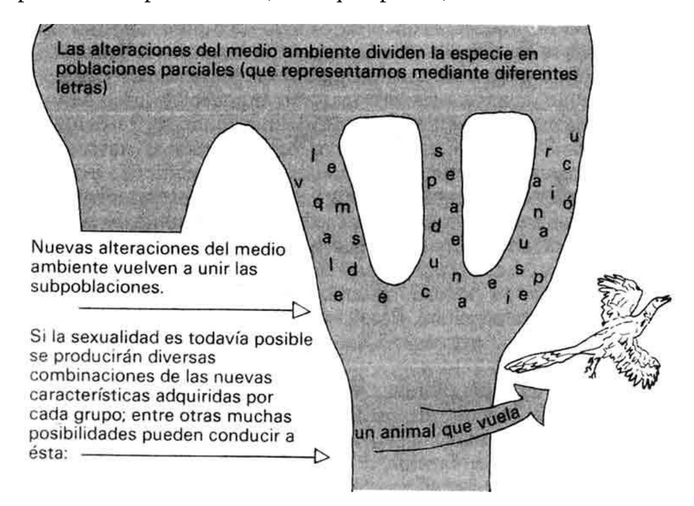
Los «grandes pasos» de la evolución han resultado siempre muy enigmáticos. ¿Cómo es posible que llegue a formarse el esqueleto de los vertebrados con toda su complejidad? ¿Cómo pudo ser que los reptiles dieran lugar «de repente» a los mamíferos? ¿Cómo es posible que los lagartos se transformen en aves?

Cualquier avance requiere un gran número de mutaciones que han de surgir *independientemente* en pequeñas poblaciones separadas. Parece difícil que todas las mutaciones necesarias para un gran avance evolutivo puedan ir acumulándose poco a poco en una misma población. Para que pueda producirse y establecerse el programa genético necesario para un paso evolutivo parcial, dicho programa tiene que ofrecer ventajas frente a la selección natural. Hay que añadir, sin embargo, que estas ventajas no tienen por qué estar orientadas en la misma dirección que el resultado final. Para comprender

esto pondremos un ejemplo que bien pudo suceder, aunque no ha sido demostrado científicamente:

Es sabido que las plumas se desarrollaron a partir de las escamas de los reptiles. Pero un lagarto que hubiera desarrollado plumas no tenía que volar para obtener alguna ventaja de ellas frente a la selección. Podría ser que el aislamiento térmico que le proporcionaban las plumas le permitiera conquistar nuevos hábitats e ir convirtiéndose gradualmente en un animal de sangre caliente (homeotermo).

Si otro grupo escindido de la misma especie de lagartos hubiera desarrollado primero unas pequeñas alas membranosas y después —para aprovechar mejor esas alas— una estructura ósea más delicada y ligera, la reunificación y fusión de ambas poblaciones parciales con sus correspondientes potenciales evolutivos podría haber sido la causa del gran salto evolutivo que se produjo posteriormente. Las plumas del primer grupo se combinarían con la estructura ósea desarrollada por el segundo, y al cabo de pocas generaciones de someterse a la selección natural, nos encontraríamos con el primitivo reptil volador, el arqueoptérix, surcando los cielos.



Este esquema intenta aclarar este hipotético ejemplo del potencial de la episexualidad.

Es siempre la episexualidad lo que reunifica y funde repentinamente las nuevas facultades adquiridas por los miembros de poblaciones separadas, proporcionando el impulso necesario para un importante salto evolutivo. La aparición del hombre sobre la Tierra sólo puede explicarse imaginando que nuestros antepasados estaban divididos en pequeños grupos —que, naturalmente, practicaban el incesto— que llegaron a conseguir independientemente diferentes avances genéticos. A través de fusiones ocasionales entre estas pequeñas poblaciones, estos avances pudieron reunirse en una sola población. *Créer c'est unir* (Crear es unir).

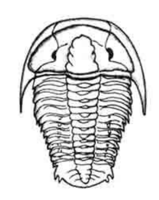
La episexualidad se produce en períodos de tiempo relativamente cortos. Una separación demasiado larga podría llegar a romper completamente los vínculos existentes entre las poblaciones de una misma especie. Una vez se hayan combinado armónicamente los avances genéticos conseguidos independientemente por diferentes grupos —y a través de la sexualidad son puestas a prueba todas las posibles combinaciones—, podrán volver a formarse nuevos subgrupos que intenten abrirse paso en un medio ambiente totalmente nuevo.

Este proceso, que ha de producirse con relativa rapidez y en poblaciones pequeñas, podría ser la respuesta a la principal objeción que levanta la teoría de la evolución: de todas las especies se han encontrado restos fósiles de lo que parecían ser fases muy estables, pero no se han hallado fósiles de las formas intermedias que tuvieron que existir en las fases de transición. Continuamente se hace alusión a estos «eslabones perdidos» que demostrarían definitivamente la validez de las líneas evolutivas propuestas por la biología.

Sin embargo, acabamos de ver que los acontecimientos decisivos sólo pueden producirse en *pequeñas* poblaciones parciales, y que los grandes saltos evolutivos sólo permanecen durante muy poco tiempo como formas intermedias. Una vez se ha producido este salto, en muy pocas generaciones se

vuelve a establecer la armonía y la estabilidad, a no ser que sea eliminado por la selección.

Por la misma razón podríamos esperar encontrar en nuestras carreteras no sólo tipos definidos de automóviles, sino toda la gama de formas intermedias; es decir, todas las fases intermedias de los modelos desarrollados por la industria automovilística. La naturaleza, al igual que la industria automovilística, sólo experimenta con unos pocos ejemplares. Después, al igual que ocurre con los automóviles, la mayoría de los experimentos son desechados y no llegan a ser producidos «en serie». Sólo en algunas ocasiones, un modelo experimental llega a tener éxito; es entonces cuando, en sólo unas pocas generaciones, una especie animal consigue abrirse camino y convertirse en un tipo de animal definitivamente adaptado a su medio ambiente. Sólo tras esta fase de experimentación y adaptación empezará a darse la reproducción masiva de la nueva estructura. Así pues, cuando se dice que hasta ahora se han encontrado millones de trilobites fósiles y montañas de moluscos fósiles, pero sólo cinco ejemplares de arqueoptérix, es precisamente esta proporción la mejor prueba de que los primeros existieron millones o miles de millones, mientras que los animales que constituyeron una fase de transición fueron muchos menos; lo que demuestra también que los períodos de transición fueron muy rápidos y sólo se dieron en poblaciones muy pequeñas con un hábitat muy limitado.



Los trilobites (con una longitud que va desde unos pocos hasta 75 cm) son los fósiles que más abundan en el fondo del mar. Estos organismos aparecieron hace aproximadamente 600 millones de años, y se extinguieron hace unos 200 millones de años. Se conocen más de 250 variedades.

Cuando al fin llega a producirse un nuevo modelo estructural dotado de nuevas capacidades se produce una situación excepcional. Asistimos a la apertura de un nuevo espacio vital. Durante cierto tiempo, la ausencia de enemigos y la desaparición de los ex congéneres que les hacían la compe-

tencia liberan a la nueva especie de la presión de la selección natural. Algo parecido ocurre también cuando una especie irrumpe en un nuevo hábitat amplio y deshabitado, por ejemplo, en un continente al que aún no han llegado miembros de especies parecidas.

En estos casos parece como si la naturaleza pudiera permitirse cualquier capricho; hasta los organismos mutantes, que en otras circunstancias hubieran tenido muy pocas probabilidades de sobrevivir, encuentran ahora una fuente de alimentación adecuada, una pareja sexual y un espacio vital propio del que no serán inmediatamente expulsados por sus competidores. La nueva situación permite a la especie una libertad de experimentación inimaginable en otras circunstancias, aunque no por mucho tiempo, ya que muy pronto habrán quedado ocupados todos los *nichos ecológicos* disponibles.

Este término técnico no abarca sólo el hábitat propiamente dicho (la montaña, el desierto, el bosque de coníferas, los espacios subterráneos, etc.), sino también las fuentes de alimentación, la posibilidad de encontrar cobijo y todos los factores importantes para la existencia de una especie. La competencia entre las especies exige que cada una de ellas tenga su propio nicho ecológico. Cuando en una situación inicial existen muchos nichos vacíos, hasta los organismos con mutaciones de dudoso valor pueden sobrevivir y, ocupando un nicho ecológico diferente, llegar a convertirse en una especie independiente. Así, podría darse el caso —y volvemos a presentar otro ejemplo hipotético— de que, por una mutación, se produjera una deformación de las patas delanteras del animal que dificultara su caminar, pero que le permitiera excavar agujeros en la tierra. Dedicándose a excavar agujeros este animal podría encontrar una nueva fuente de alimentación y sobrevivir. Sólo al cabo de cierto tiempo, cuando la situación se hubiera normalizado y excavar agujeros se hubiera convertido en una costumbre de estos animales, surgiría una presión selectiva que conduciría al desarrollo de topos cada vez más eficientes en la actividad de excavar, y al surgimiento de una nueva especie.

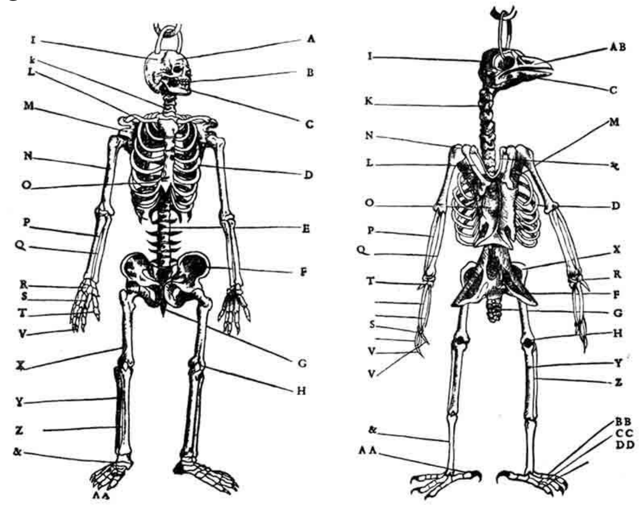
Este ejemplo nos proporciona la ocasión de señalar que en términos generales —es decir, incluso aunque todos los nichos ecológicos de un hábitat se encuentren ocupados— una mutación en principio negativa puede prosperar sin perjuicio para el organismo si la facultad afectada por tal mutación no está sometida a la presión de la selección natural. Así, por ejemplo, los ojos del topo llegan a atrofiarse, puesto que ya no suponen ninguna ventaja frente a la selección. La evolución regresiva de facultades que hasta cierto momento habían sido importantes se produce cuando desaparece la presión ejercida por la selección, debido a que las mutaciones negativas no son eliminadas y se van acumulando a través de las generaciones. Así, muchos animales que viven bajo tierra o en cavernas presentan una degeneración de su pigmentación, que anteriormente había sido necesaria como protección, pero que ahora, por la falta de luz, no tiene utilidad. Las mutaciones se producen constantemente y en todas direcciones. La presión que ejerce la selección natural es necesaria para perfeccionar los órganos y sus funciones, pero también simplemente para conservarlos.

Éstas son, por tanto, las causas de que exista tal diversidad de especies, tanto en el reino animal como en el vegetal. Al profano en la materia podría parecerle extraño que, mientras que para que llegara a configurarse un organismo celular medianamente organizado fueron necesarios dos o tres mil millones de años, sólo se hayan necesitado quinientos millones de años para desarrollar toda una gran diversidad de organismos pluricelulares entre los que se incluye el hombre. Realmente las especies son muy numerosas.

La labor sistemática de los biólogos ha llegado a contabilizar unas 400.000 especies de plantas existentes en la actualidad, y hasta 1,2 millones de animales, de los que 900.000 son insectos. Pero existieron muchas otras especies que, como los trilobites o los saurios, como los mamuts o los tigres de dientes de sable, sucumbieron a lo largo de la evolución. La aparición de nuevos competidores o enemigos, las enfermedades infecciosas, las catástrofes geológicas o los cambios climáticos drásticos fueron las causas de su extinción.

El rápido desarrollo de los organismos pluricelulares que llega a desembocar en esa gran diversidad de especies resulta más comprensible teniendo presente las similitudes que existen entre ellas; por ejemplo, entre todos los animales vertebrados. Ésta es una observación que ya efectuaron nuestros antepasados del siglo XVI, como demuestra el gráfico siguiente, en el que se estudian los paralelismos existentes entre el esqueleto humano y el de un ave.

Ya conocemos las causas de este parentesco: la gradual prolongación, alteración o perfeccionamiento del programa regulador del desarrollo embrionario.



(De Pierre Belon: L'histoire des oyseaux, 1555)

Las numerosas razas caninas que se han desarrollado en unos pocos siglos demuestran claramente que sólo hacen falta unas mínimas alteraciones genéticas para producir resultados espectaculares (argumento que ya expuso en su tiempo Charles Darwin). Que haya sido posible que en menos de cien generaciones se hayan creado razas como teckel, galgo o San Bernardo demuestra el enorme potencial de variación contenido en la información genética. También revela lo fácil que

tuvo que ser para la naturaleza producir ese elevado número de especies que, como surgidas del cuerno de la abundancia, pueblan nuestro planeta, habiendo dispuesto de millones de años.

Una casualidad geológica ha hecho que el continente australiano sea un buen ejemplo del proceso de formación de especies. Australia se separó del resto de la tierra firme precisamente en el momento en que se iniciaba un vigoroso desarrollo de los mamíferos. Casualmente, ninguno de los nuevos mamíferos había llegado a este continente, de modo que allí se desarrolló únicamente una rama de los mamíferos, la de los marsupiales.

Al igual que los mamíferos, los marsupiales son vivíparos, pero sus crías se encuentran en una fase temprana de gestación y han de continuar formándose en la bolsa de la madre —las crías, de sólo unos milímetros de tamaño, tienen que trepar hasta la bolsa de la madre por sus propios medios—, alimentándose, no mediante un cordón umbilical, sino de la leche segregada por las glándulas que la madre tiene dentro de su bolsa. Fuera de Australia sólo los opósum han conseguido sobrevivir a la competencia con los mamíferos placentarios.

En vez de los mamíferos placentarios, en Australia se desarrollaron los marsupiales, que han hecho su reino de este continente, diferenciándose a partir de un animal primario en todas direcciones; así surgieron las ratas marsupiales, los osos koala, los topos marsupiales, los erizos marsupiales, las ardillas marsupiales, los lobos marsupiales o lobos de Tasmania y los canguros. Éste es un claro ejemplo de la rápida variación de una estructura básica en su «adaptación» a diferentes nichos ecológicos. Lo más interesante es observar que en nuestras latitudes podemos encontrar desarrollos paralelos en los nichos que ocupan aquí los mamíferos superiores. A partir de estructuras similares, en medios ambientes similares, la evolución tiende a producir diferenciaciones similares. La existencia de los canguros (que ocupan en Australia el nicho ecológico que corresponde a los ungulados) o la de los curiosos ornitorrincos demuestra que, aparte del carácter restrictivo

de la evolución, también existe cierto grado de libertad que permite la intervención del azar.

Hay que señalar que cuando se descubrió Australia se encontraban allí también algunos mamíferos placentarios. Éstos habrían llegado como inmigrantes en un momento dado. Entre ellos se cuentan algunas especies de murciélagos, que tal vez llegarían empujados por algún huracán, y algunos pequeños roedores, cuyos antepasados llegarían a la costa medio muertos, aferrados a algún madero de un buque naufragado. Sólo mucho más tarde llegaría también el hombre y su perro, el dingo.

Hemos podido ver que después de la aparición de los organismos pluricelulares, hubo una gran proliferación de especies animales y vegetales que pobló rápidamente los mares, lagos y ríos de nuestro planeta. Hace aproximadamente cuatrocientos millones de años, algunas especies pasaron a ocupar la tierra firme. Estas especies fueron cambiando y complementando el esquema básico de su información genética y dieron lugar a una gran diversidad de especies que se extendieron por todos los continentes a través de los montes y pantanos, de los desiertos y de los campos de lava. Estas especies, bajo la presión de la selección natural, fueron cambiando y diversificando continuamente sus líneas de desarrollo, y, una y otra vez, la mayor complejidad alcanzada les permitió poner en funcionamiento nuevas capacidades que primero serían sometidas al proceso de selección.

De las algas se desarrollaron helechos, equisetos y musgos; después las gimnospermas (por ejemplo, las coníferas) y luego las angiospermas (plantas con flores). De los organismos pluricelulares más simples se desarrollaron, por una parte, los moluscos y los artrópodos (arañas, insectos y cangrejos), y, por otra, los animales vertebrados: primero los peces, después los anfibios (como las salamandras y las ranas) y más tarde los reptiles (como lagartos, tortugas y saurios gigantes); hace aproximadamente 200 millones de años, surgieron de los reptiles los animales de sangre caliente (mamíferos y, algo después, las aves).

Hace aproximadamente 30 millones de años que existen los monos y, finalmente, sólo hace entre dos y cinco millones de años que existe el hombre.

Cuando se habla de la evolución suele pensarse sólo en esta última parte de todo el largo proceso de aumento de la complejidad y diversidad de las estructuras. Sin embargo, hemos podido ver que el desarrollo de los organismos pluricelulares no constituye más que una pequeña parte del proceso de la evolución; eso sí, es la parte en la que se concentra la investigación científica y a la que dedicaron su vida científicos como Lamarck y Darwin; además es la parte de la evolución que ha quedado registrada por los fósiles de plantas y animales en las capas sedimentarias que componen la superficie de nuestra Tierra.

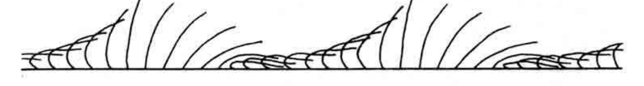
16. EL SISTEMA NERVIOSO: MECANISMO AUTOMÁTICO DE ESTÍMULO-RESPUESTA

> «Está claro que la materia se mueve por ciertas leyes que, en un determinado estadio de desarrollo del ser orgánico, tuvieron que producir necesariamente la inteligencia.»
>
> ENGELS

Para que un ave pueda volar, un gato pueda saltar por encima de las altas hierbas y un pez pueda nadar en el agua, es necesario que determinados músculos se muevan con movimientos bien programados y coordinados. Para que una lombriz pueda encontrar la tierra húmeda y una libélula pueda reconocer a su presa; para que la vista del enemigo desencadene el instinto de huida y la visión de una hembra el instinto sexual, es necesario que las percepciones sensoriales sean evaluadas y transformadas en reacciones concretas encaminadas a un fin determinado. De ahí que sea tan importante para todos los animales reconocer el mundo exterior mediante sus órganos de percepción, poder evaluar de forma lógica los estímulos percibidos, y, finalmente, poder reaccionar a ellos de forma que quede asegurada su supervivencia y la perpetuación de la especie. Todo esto se hace posible mediante el funcionamiento de un *sistema nervioso central, es* decir, del cerebro.

Aparte de las necesarias reacciones ante los estímulos que llegan del exterior, el funcionamiento normal de un organismo animal requiere una cooperación armónica de innumerables órganos. La necesidad de coordinación surge ya en la fase evolutiva de los organismos unicelulares más desarrollados, capaces, por ejemplo, de moverse por el agua impulsados por el movimiento de un gran número de cilios o pestañas. Si cada uno de estos cilios se moviera por su cuenta, no se pro-

duciría un movimiento direccional determinado. Éste tan sólo puede lograrse mediante la coordinación del movimiento de los diferentes cilios:

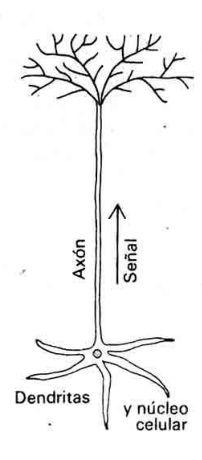


Incluso en el nivel evolutivo de los organismos unicelulares, la coordinación de los actos de las diferentes partes del ser es una función importante. Y su importancia aumenta en los sistemas más complejos. La coordinación de sus funciones es vital para cualquier organismo pluricelular, para cualquier entidad industrial o administrativa. La eficiencia y la flexibilidad en la acción y reacción de cualquier entidad compleja sólo pueden lograrse utilizando una red interna para la transmisión de informaciones. El imperio romano, y el inca, basaban su fuerza en una red de estafetas que, mediante veloces jinetes o corredores, transmitía las noticias a la capital y las órdenes a las provincias.

Durante la fase de desarrollo embrionario de un organismo pluricelular, la coordinación de los procesos locales puede realizarse utilizando un sistema de señales *químicas.* Para ello hay suficiente tiempo: se dispone de días, semanas o meses de gestación. Sin embargo, los animales, en su lucha por la supervivencia, necesitan reaccionar inmediatamente a las situaciones con que se enfrentan en el medio ambiente; esto exige que el animal tome decisiones rápidas y coordine sus movimientos de forma precisa. Los animales pluricelulares han llegado a desarrollar un tipo especial de células que se encargan de desempeñar esta función de coordinación. Estas células constituyen el punto de partida de la tercera fase de la evolución; son las *células nerviosas.*

¿Qué tienen de extraordinario las células nerviosas? En muchos aspectos son semejantes a otras células especializadas. Contienen el mismo ADN en su núcleo y utilizan el mismo código genético para la síntesis de proteínas que todas las demás células. Pero se caracterizan por dos cualidades

importantes: su peculiar forma y las especiales propiedades de su membrana.



Las células nerviosas (las *(neuronas)* en terminología científica) pueden llegar a tener una longitud de hasta 1.5 mm, y presentan una forma parecida a la de un árbol. Las raíces de ese árbol están formadas por las *dendritas,* que, como veremos más adelante, sirven para canalizar las señales procedentes de otras células nerviosas. El tronco del árbol se denomina axón. Éste transmite las señales a otras neuronas a través de sus ramificaciones. Pero lo más importante de las neuronas es que tienen la capacidad de transmitir señales eléctricas (mediante impulsos generados en la misma célula). Esta facultad se basa en las propiedades de la membrana, que, por explicarlo de algún modo, está formada como si fuera una larga hilera de fichas de dominó colocadas en posición vertical. Cuando se tumba una de las fichas de los extremos, la señal recorre toda la hilera de fichas a lo largo del axón, distribuyéndose después por todas sus ramificaciones. Tras un período de descanso (de unos milisegundos), todas las fichas vuelven a ponerse en pie y quedan listas para transmitir una nueva señal. La *potencia* del estímulo sólo puede quedar reflejada en la frecuencia de la transmisión de las señales,

puesto que las fichas sólo tienen la posibilidad de tumbarse y volverse a levantar.

Las terminaciones ramificadas del axón pueden estar vinculadas a un músculo y estimularlo para que se contraiga mediante sus señales, pero en la mayoría de los casos estarán conectadas a las dendritas de otras neuronas. A estos puntos de conexión se les denomina *sinapsis,* son los relés mediante los cuales las señales eléctricas son transmitidas de una célula nerviosa a otra.

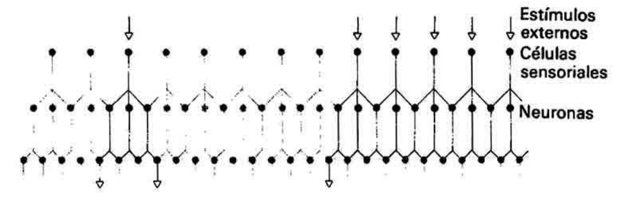
Una sola neurona puede llegar a establecer hasta 10.000 sinapsis con otras neuronas. Así llega a formarse una red de extraordinaria complejidad, frente a la cual el diagrama de conexiones de un aparato de radio parecería ridículamente simple. Gracias a este circuito tan complejo las señales eléctricas pueden ser transmitidas de neurona en neurona.

Pero si eso fuera todo, cada estímulo haría reaccionar prácticamente a todas las neuronas de la red. Por tanto, dicha red tiene que presentar una mayor complejidad. Una de sus características más importantes es que esta red de distribución está formada por dos tipos de neuronas: las estimuladoras y las inhibidoras. Los dos tipos funcionan de forma análoga, pero sus sinapsis sólo transmiten una influencia estimuladora o una influencia inhibidora, respectivamente.

Cada neurona —estimuladora o inhibidora— recibe a través de la sinapsis de sus dendritas señales estimuladoras *e* inhibidoras y las «suma». Cuando predominan las señales estimuladoras, la célula nerviosa «dispara» una señal a lo largo del axón (recordemos el símil de las fichas de dominó tumbándose una tras otra), que, al llegar a las sinapsis, transmitirá su influencia estimuladora o inhibidora según el tipo de neuronas de que se trate. Cuando predominan los estímulos inhibidores, la neurona no reacciona.

Según el diagrama de este circuito, compuesto por neuronas estimuladoras e inhibidoras, y según el tipo de estímulos iniciales, el centro nervioso recibirá diferentes tipos de señales. Un ejemplo relativamente simple nos ayudará a entenderlo.

El esquema que presentamos a continuación pretende representar un sistema nervioso bastante primitivo. Desde arriba (representados por flechas) llegan los estímulos externos que hacen reaccionar a las células sensoriales. Estas son células nerviosas muy especiales que responden a los estímulos externos (por ejemplo, a la cantidad de luz) transmitiendo señales a lo largo de su axón, con lo que estimulan a las neuronas situadas en la segunda hilera. Las células nerviosas que «disparan» están representadas en nuestro diagrama con un color fuerte. Son excitadas tanto las células estimuladoras como las células inhibidoras (en diferentes tonos de gris), y las señales son enviadas a las células de la tercera fila. Pero éstas sólo «dispararán» cuando el número de señales estimuladoras *supere* al número de señales inhibidoras. En nuestro esquema la mayoría de las neuronas de la tercera hilera reciben una señal estimulante y otra inhibidora y, por tanto, permanecen indiferentes. Puede apreciarse fácilmente que en un circuito como el representado, los estímulos sólo son transmitidos cuando en la hilera de células sensoriales las células adyacentes son excitadas de *forma diferente* por los estímulos procedentes del exterior.



Con un sistema nervioso de este tipo, un entorno uniformemente claro u oscuro no estimularía en absoluto el ojo de un animal. En cambio, las diferencias de matices provocarían la emisión de señales que serían enviadas al cerebro.

Una vez surgen en el transcurso de la evolución los diferentes tipos de células nerviosas, la selección se encarga de fomentar un rápido perfeccionamiento del funcionamiento del sistema. Así, por ejemplo, la velocidad de la transmisión de señales en organismos primitivos es del orden de 1 cm por segundo, y

llega a alcanzar los 120 m por segundo en los mamíferos. Para alcanzar esta perfección fue de crucial importancia el paso evolutivo que permitió el desarrollo de animales de sangre caliente. Todos los procesos que se desarrollan en el cerebro están basados en reacciones bioquímicas que se producen en las células nerviosas y en sus sinapsis. Una temperatura alta y constante permite un funcionamiento continuo y más eficiente del sistema nervioso. No es casualidad que los dos tipos de animales (mamíferos y aves) con mayor rendimiento cerebral sean animales de sangre caliente.

Las funciones del sistema nervioso central son tan cruciales para todos los tipos de animales, que puede decirse que su rendimiento puede ser considerado como medida de su capacidad de supervivencia. Naturalmente, existen otros factores importantes —por ejemplo, una pigmentación protectora, el número de descendientes, etc.—, pero puede afirmarse que la evolución de los animales pluricelulares se caracteriza principalmente por el desarrollo de la capacidad de su sistema nervioso.

Aparte de las propiedades de las células nerviosas, lo más importante para el desarrollo de la capacidad del sistema nervioso es el patrón de conexión de las neuronas. En los gusanos inferiores (nematodos) se ha podido observar todo el esquema de conexiones de sus células nerviosas. Algunos ejemplares mutantes presentan desviaciones hereditarias del diagrama general de la especie. En otros animales también se ha podido observar el sistema nervioso de diferentes ejemplares de la misma especie y, al menos en términos generales, sus conexiones se derivan de un mismo diagrama-patrón.

Esto sólo puede ser posible si el diagrama de conexiones se halla determinado en la información genética. Al igual que en la fase de desarrollo del embrión se va formando la estructura ósea de los mamíferos según el programa espacial y temporal contenido en la información genética, el diagrama de conexiones de las neuronas tiene que formarse siguiendo las instrucciones contenidas en el ADN.

Podríamos preguntarnos si es posible que la información contenida en el ADN sea suficiente para determinar la cons-

trucción de un circuito tan complejo. La respuesta es que, *en detalle,* esto no es posible; la cantidad de ADN de los organismos no es suficiente para determinar las sinapsis que deben establecerse ni con qué neuronas deben establecerse. Pero la información contenida en el ADN sí puede establecer unas instrucciones *globales* para determinadas neuronas. Estas directrices generales podrían ser, por ejemplo, del tipo de: «colocaos formando una secuencia alternante de neuronas estimuladoras e inhibidoras», o «cada una de vosotras deberá unirse a las tres neuronas inmediatamente posteriores». En efecto, en todos los sistemas nerviosos puede observarse claramente cierta periodicidad en las conexiones.

Con la determinación del esquema general de conexiones del sistema nervioso, las estructuras genéticas han llegado a su máxima efectividad. La información genética, además de las instrucciones codificadas para producir los numerosos tipos de células que componen un organismo pluricelular, y además del programa espaciotemporal mediante el cual puede llevarse a la práctica el plano de construcción del organismo durante el período de gestación, contiene también las instrucciones para la organización general de las conexiones de la red de neuronas. Estas conexiones no sólo regulan procesos vitales —como la actividad cardíaca o respiratoria—, sino que hacen posible la respuesta del organismo a los retos del mundo exterior. El animal viene al mundo dotado de un ordenador que se encarga de procesar los estímulos sensoriales y de proporcionar automáticamente las respuestas que mejor garanticen su supervivencia.

Y, puesto que tal capacidad representa, incluso en sus estadios más primitivos, una enorme ventaja frente a la selección natural, tenderá a perfeccionarse rápidamente. Las mutaciones que se produzcan en el ADN provocarán ciertas alteraciones y ampliaciones en los órganos de percepción o en el diagrama de conexiones y distribución de las neuronas. La selección, al igual que en todo el proceso evolutivo anterior, favorecerá la supervivencia de aquellos organismos que presenten estas mejoras, que serán transmitidas a sus descendientes; es decir, fomentará las alteraciones que contribuyan a que

el organismo obtenga una información más precisa del mundo exterior o a que dicha información pueda utilizarse con mayor provecho. El resultado es la capacidad de reacción de un animal ante los estímulos procedentes de las diversas situaciones que encuentra en su medio ambiente, y es la medida básica que utiliza la selección para «juzgar» a los organismos mutantes.

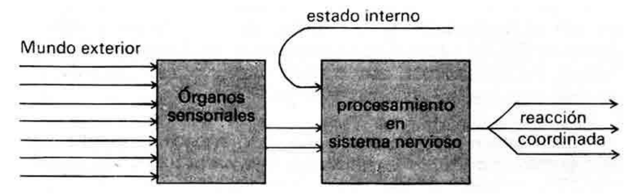
El «procesamiento» de la información consiste en condensar o reducir la información a lo «verdaderamente importante». Los órganos de percepción desempeñan en este sentido la función de un «filtro» que, de todos los innumerables estímulos procedentes del mundo exterior, recoge sólo los que puedan tener importancia para el organismo, transmitiéndolos al cerebro. Así pues, los órganos sensoriales establecen *un código de señales que describen el mundo exterior de una forma extremadamente simplificada.*

Los órganos sensoriales y la red de células nerviosas están conectados de tal forma que sólo puede llegar al cerebro lo que es esencialmente importante. Además, el sistema de neuronas está distribuido de manera que ciertos tipos de estímulo desencadenan automáticamente unas reacciones concretas: los centros nerviosos envían a través de la red una corriente motora que genera la acción dentro de un programa coordinado.

El procesamiento de los estímulos no se limita sólo a los que se reciben del mundo exterior; también se toma en cuenta el estado interno del organismo. Por ejemplo, ciertos fenómenos hormonales pueden generar una «disposición al apareamiento» que, transmitida a través del sistema nervioso, puede tener como consecuencia que la visión de una presa —que normalmente desencadenaría el instinto de caza— no provoque ninguna reacción.

La «sensación de hambre» es otro ejemplo de estímulo interno. Sin embargo, un animal nocturno sólo convertirá este estímulo interno en una reacción que le incite a cazar cuando sus órganos de percepción le confirmen que el medio ambiente presenta las circunstancias apropiadas para cazar, es decir, que es de noche. Así pues, las señales de origen interno y externo influyen conjuntamente sobre el comportamiento.

Hay dos factores esenciales para el buen funcionamiento de estos procesos automáticos: en primer lugar, una selección y «traducción» de la enorme oferta de estímulos procedentes del mundo exterior a través de los órganos de percepción; en segundo lugar, el esquema de conexiones del aparato procesador desencadenará una respuesta en forma de determinado comportamiento dependiendo de la combinación de estímulos recluidos. Los movimientos que tengan lugar en el entorno tienen una importancia extraordinaria para todo tipo de animales, puesto que pueden significar, por ejemplo, peligro o la aparición de una presa. Por tanto, es natural que los centros nerviosos, mediante una serie de señales coordinadas transmitidas a los músculos de los ojos y del cuello, permitan de forma automática que el animal «no pierda de vista» el objeto que se halla en movimiento.



En algunos casos un estímulo concreto desencadena un comportamiento determinado. Por ejemplo, el pez espinoso macho se vuelve agresivo en cuanto ve aparecer en su territorio el vientre rojo de algún rival. El pico abierto de las crías de los pájaros es también un estímulo-señal que provoca en los padres el comportamiento necesario para alimentarlos. A veces, ciertos estímulos-señal desencadenan secuencias de comportamientos complejas y de larga duración. Estos comportamientos son siempre innatos, no adquiridos; están impresos en la información genética del animal y programados en sus circuitos nerviosos. Así, en los animales inferiores, una vez se ha desencadenado cierto comportamiento, el organismo lo desarrolla como si fuera un autómata, incluso cuando se produce un accidente que hace que seguir desarrollándolo carezca de sentido.

Por ejemplo, si se interrumpe a una araña que está tejiendo el capullo en el que deposita sus huevos, tratará de construir otro capullo, pero en vez de empezar desde el principio, continuará a partir del punto en que se la haya interrumpido. Si la glándula que produce el hilo se seca (por ejemplo, por el calor de los focos en una filmación), la araña continuará ejecutando los aproximadamente 6.400 movimientos necesarios para la construcción del capullo, sin comprender el sinsentido de su actividad. Evidentemente, este tipo de alteraciones extraordinarias no está previsto en su programa genético.

Hasta ahora hemos estado evitando conscientemente mencionar otra importante facultad del sistema nervioso: la «memoria». El organismo de reacciones automáticas que acabamos de describir no es capaz de asimilar sus experiencias. Esta nueva facultad de esa gran estructura que es el sistema nervioso, pertenece a una fase posterior de la evolución, de la que nos ocuparemos en la siguiente parte de este libro.

Puede parecer artificial que establezcamos una división de este tipo, puesto que en los organismos animales inferiores aparecen ya ciertos rudimentos de memoria, y puesto que en los animales superiores las reacciones automáticas y las reacciones afectadas por la memoria están estrechamente vinculadas. Pero llegados a este estadio de la evolución se nos presenta una nueva frontera: hasta aquí la información genética heredada era el único sistema determinante a partir de este límite, surge un segundo sistema de información que va a controlar cada vez más la existencia de los animales.

EVOLUCIÓN INTELECTUAL

17. LA EVASIÓN DE LA CÁRCEL DEL PRESENTE

> «Para una criatura racional la memoria es la facultad más importante después de la sensibilidad: su importancia es tal, que sin ella pierden el sentido todas las demás facultades.»
>
> LOCKE

En el comienzo de la tercera fase de la evolución nos encontramos con una nueva facultad de las estructuras. Anteriormente, hace miles de millones de años, el aumento de la complejidad de las estructuras había abierto el camino hacia un mundo completamente nuevo: algunas estructuras adquirieron la capacidad de autoduplicarse. La capacidad a la que ahora nos referimos es comparable en importancia con aquel tremendo avance evolutivo. El sistema nervioso —elaborado para coordinar internamente las funciones del organismo y para procesar los estímulos captados por los órganos sensoriales— va a permitir ahora trascender los límites del tiempo. El animal consigue escapar de la cárcel del presente y descubre una nueva dimensión para su existencia. Hasta ahora su organismo se encontraba encadenado al presente; no tenía noción del pasado ni del futuro. Para él sólo existía un mundo exterior: el *aquí* y el *ahora* que percibían sus sentidos. Estaba programado para el mundo del presente. El ayer no existía: no tenía memoria y, por tanto, no podía recordar. Aunque todas sus células eran portadoras del pasado de su especie —cristalizado en el ADN—, que le había convertido en lo que era ahora, su cerebro (su procesador de datos) no se diferenciaba en nada del de sus congéneres.

Cada organismo animal no era sino un autómata sin nombre que había sido producido «en serie» por otros autómatas iguales. El organismo aún no era un individuo. Sus reacciones

eran respuestas condicionadas, determinadas en el ADN por la historia evolutiva de sus antepasados. Podían ocurrirle muchas cosas a lo largo de su vida, pero su cerebro no poseía la capacidad de asimilar experiencias. La vida pasaba a través de su cerebro sin dejar huella.

Pero ahora iba a experimentar un cambio. La nueva facultad de lo que había llegado a ser ya una gigantesca estructura introducía al animal en la dimensión del tiempo: en el circuito de neuronas aparecen sectores estructurales «moldeables», es decir, sectores dotados de todos los elementos básicos necesarios para configurarse, pero sin una estructuración definitiva. Son sectores que poseen una «plasticidad» y que pueden ser moldeados por ciertas informaciones. Determinados estímulos sensoriales que antes se limitaban a pasar rápidamente por el cerebro, ahora dejan huella tras de sí: impresiones que quedan grabadas y se conservan a través del tiempo. El cerebro deja de ser meramente un autómata programado para el presente y se convierte además en un registro del pasado. Ahora el animal es capaz de registrar y acumular experiencias y de tenerlas en cuenta a la hora de tomar decisiones.

Tras haber conquistado la capacidad de autoduplicarse, es decir, tras el surgimiento del sistema de información genética, éste es un segundo paso, casi milagroso, que abre una nueva fase en la evolución de la vida animal.

La descripción del proceso evolutivo que hemos ido dando en este libro podría causar en algún momento la falsa impresión de que antes de que se produzca un nuevo desarrollo es necesario que se hayan concluido los que se iniciaron anteriormente. Así, hemos hablado de formación de una gran diversidad de especies, hasta llegar a los mamíferos, sin paramos a considerar el desarrollo del sistema nervioso. También hemos comentado el automatismo del sistema nervioso sin hablar de su capacidad de registro. Pero, en realidad, la evolución puede compararse a un gran río en el que el desarrollo de diferentes facultades no se produce en un orden cronológico.

Así pues, la nueva capacidad de registro de percepciones sensoriales no puede considerarse independientemente de un

desarrollo continuo hacia el perfeccionamiento de los mecanismos automáticos del cerebro. Ambos desarrollos progresan paralelamente durante mucho tiempo, y ambos están estrechamente ligados a un aumento de la información genética, en cuyas instrucciones queda determinada la distribución general de las neuronas.

Sin embargo, en algún momento y de alguna manera, se otorgó cierto margen de libertad a determinados sectores del circuito, de forma que todas las sinapsis del sistema no quedaran determinadas de antemano. Tal vez fue una alteración del ADN que, en ciertos sectores del sistema nervioso, exigiera sólo que las neuronas desarrollaran sus axones en lugares concretos del cerebro y que establecieran conexiones *fortuitas* con las células nerviosas que encontraran allí. Esto permitiría un aumento del número de neuronas del organismo sin necesidad de aumentar la información contenida en el ADN. (De hecho, todos los mamíferos, incluido el hombre, tienen aproximadamente la misma cantidad proporcional de ADN: unos 7×10^{-12} gramos por núcleo celular.) Este surgimiento de un nuevo tipo de inexactitud pudo ser lo que lanzó el balón de la evolución al campo de la tercera fase.

Pero ¿a qué se debe la formación de los diferentes sectores cerebrales? ¿Qué clase de alteraciones moleculares se producen en las neuronas de estos sectores diferenciados? La mayoría de los expertos supone que lo esencial del proceso se desarrolla en las sinapsis de estos sectores, es decir, en las conexiones entre las neuronas individuales. Se cree que al ir repitiéndose su estimulación las sinapsis van adquiriendo cada vez mayor capacidad de transmisión de señales. Cuantas más veces se active un determinado relé (léase sinapsis) en el circuito de neuronas, mayor será su capacidad de transmisión. Cuando más andado esté un camino, mejor se podrá andar por él.

Por tanto, puede decirse que en un cerebro recién formado las sinapsis de los sectores destinados a acumular experiencias e información son todavía conexiones en potencia. Sólo por repetición de la estimulación se llegan a constituir estas sinapsis que forman circuitos tremendamente sensibles. Pues-

to que cada individuo está expuesto a diferentes estímulos externos, sus conexiones neuronales se van formando de manera diferente. Existen otros sectores cerebrales que no son moldeables: sus conexiones están establecidas definitivamente desde el nacimiento y su funcionamiento es automático. Esto ocurre, por ejemplo, con los circuitos que controlan las pulsaciones del corazón o el instinto de mamar de los recién nacidos.

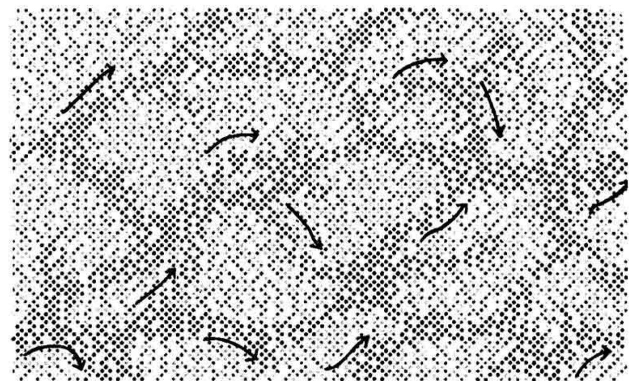
Sabemos con certeza que las conexiones neuronales del hombre se amplían considerablemente durante los primeros años de vida. El número de sinapsis aumenta de forma importante. Esto ha sido confirmado en los experimentos realizados con ratas: un grupo de ratas se somete desde su nacimiento a condiciones de extrema monotonía (total oscuridad, aislamiento de ruidos, olores, etc.), y otro se expone a toda clase de estímulos excitantes. En el desarrollo de los circuitos neuronales de los dos grupos pueden observarse claras diferencias. Los animales sometidos a constantes estímulos presentan un mayor número de conexiones neuronales, es decir, de sinapsis. Estos resultados indican que los estímulos procedentes del exterior no sólo ponen en funcionamiento las conexiones neuronales preexistentes, sino que además fomentan la formación de nuevas conexiones en el cerebro.

Para poder evitar falsos conceptos de consecuencias irreparables, queremos llamar la atención de los padres de niños pequeños sobre el hecho de que no hay nada mejor para un bebé que ser «estimulado» (generalmente por su madre) dentro de cierta estabilidad emocional. Una activación moderada de los sentidos del niño fomenta su desarrollo cerebral. Sin embargo, no hay nada peor que la sobreexcitación, que puede conducir al miedo y a la neurosis. A veces, lo que para un adulto no es más que un proceso largo y monótono, para el niño de pecho es como una explosión de fuegos artificiales desconcertante. La repetición frecuente de un proceso contribuye a su asimilación mental.

¿Es posible representar en un esquema el aspecto que presenta en el cerebro un circuito de conexiones ya «trillado»? (denominación científica: «engrama»). La ampliación del

esquema del circuito de conexiones que habíamos presentado en el capítulo anterior nos da una ligera idea. Si pasamos por alto las múltiples conexiones transversales y nos limitamos a resaltar las neuronas que «disparan» una señal podemos seguir la actividad (flechas) que se desencadena en un sistema nervioso (las neuronas. en la página siguiente, se representan mediante puntos).

Por la repetición del estímulo llega a grabarse un «canal de estimulación de forma que cualquier pequeño estímulo será después suficiente para activar el circuito y ponerlo en un estado de excitación ya conocido. De este modo la estructura moldeable habrá adquirido una configuración determinada.



(Según Eccles)

Estos «canales de excitación» de las neuronas construyen una «imagen» del mundo exterior. Y al decir «imagen» lo decimos en el sentido más amplio de la palabra. La *configuración* espacial del circuito *neuronal no se parece en lo más mínimo* a la forma —por ejemplo— del árbol cuya imagen se refleja en el ojo; esta imagen es «transformada» por el sistema nervioso y se distribuye por diferentes circuitos neuronales.

El «canal de estimulación», con sus innumerables circuitos, no guarda ningún parecido con el árbol, pero se activa siempre del mismo modo bajo la influencia de esa estructura del mundo exterior a la que debe su configuración.

Registrar y grabar las percepciones sensoriales no supone en sí ninguna ventaja para el organismo; al contrario, encierra el peligro de confundir el pasado con el presente. Son necesarias otras dos facultades —que se desarrollaron paralelamente a la capacidad de registro— para que la «memoria» sea un «invento» de tanta trascendencia para el avance de la evolución.

En primer lugar, el cerebro tiene que poder diferenciar entre el presente y el pasado, es decir, tiene que poder distinguir entre las señales que emite el registro y las que envían los órganos sensoriales en el momento. Esta capacidad no exige una noción del tiempo, es decir, una ordenación cronológica de los acontecimientos; en principio, es suficiente una separación de los acontecimientos pasados y presentes.

El segundo logro que va a permitir que la capacidad de registrar experiencias pueda convertirse en una ventaja ante la selección natural es la capacidad de poder *tener en cuenta* las experiencias vividas a la hora de tomar una decisión; en otras palabras: la inclusión de lo registrado en posteriores procesos cerebrales de estímulo-respuesta.

Aunque no vamos a detenernos ahora a analizar su funcionamiento, es evidente que la capacidad de *registrar informaciones* en determinados sectores del cerebro y la capacidad de *poder utilizar esa información* para modificar las reacciones que provocaría el procesamiento automático de los estímulos externos, abre todo un mundo de posibilidades. El sentido de la orientación, es decir, la capacidad de orientarse registrando las características de su entorno, es uno de los logros más importantes. Es lo que permite al animal volver a encontrar un abrevadero o una fuente de alimentación, buscar un cobijo seguro o construir un «nido» en donde cuidar y alimentar a sus crías. La memoria es un avance necesario para que la evolución pueda pasar a niveles más elevados.

Ahora, cuando el animal busca su guarida y ve un árbol, puede compararlo con el registro que posee en su cerebro del árbol que hay al lado de su guarida, y puede decidir si es o no «su» árbol. Pero la capacidad de su cerebro llega aún más lejos: el animal es capaz de reconocer «su» árbol *desde todos*

los ángulos. Las diferentes perspectivas de ese árbol, que estarán vinculadas a diferentes impresiones grabadas en su cerebro, desembocarán finalmente en un «canal de estimulación» común: «mi árbol».

Y, puesto que cada animal vive en un entorno diferente y recibe impresiones diferentes, la información genética no puede ayudarle, al menos de forma directa, a encontrar su guarida. Lo que sí puede hacer la información genética es definir ciertos sectores del cerebro como «espacios libres», y ordenar el circuito neuronal de forma que sean los estímulos procedentes del entorno los que establezcan y fijen las conexiones definitivas. Ahora es cuando el animal se convierte en *individuo*, ahora ya tiene *su* nido y *su* territorio. La estructura de su cerebro se diferencia de las de todos sus congéneres.

El animal cuenta ahora con *un nuevo tipo de información*. Mientras que hasta ahora la información genética era el único factor determinante de la existencia biológica, el animal dispone ahora de sectores de su cerebro que van a ser moldeados por las impresiones que recibe del mundo exterior. Ahora son estas dos fuentes de información las que, conjuntamente, van a determinar el comportamiento del individuo. El patrimonio genético y el medio ambiente establecen conjuntamente el circuito neuronal del animal. A este doble sistema compuesto por la información genética y la información recogida del medio ambiente, vamos a denominarlo *sistema de información intelectual*, aunque en un estadio inicial de desarrollo tal denominación pueda parecer demasiado pretenciosa. Pero recordemos que también el sistema genético tuvo unos orígenes humildes.

El sistema genético se originó a partir de las estructuras más desarrolladas durante la fase de la evolución material, esto es, a partir de agregados de polímeros. Si no hubieran existido estas estructuras nunca habría llegado a desarrollarse y perfeccionarse. De forma análoga, el sistema de información intelectual parte ahora de una base biológica: el sistema nervioso. La estructura más compleja que ha llegado a crear la evolución biológica constituye la base para los registros de la información intelectual.

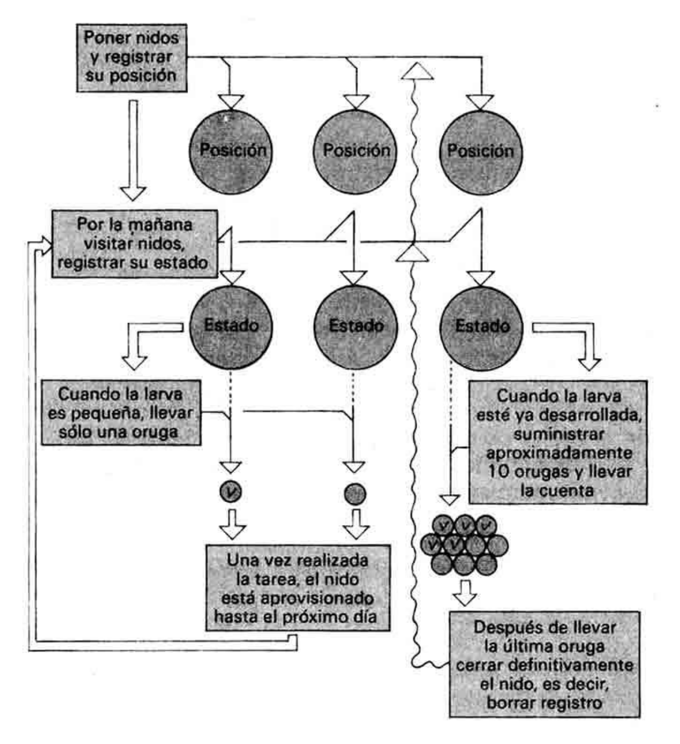
Parece ser que en los primeros estadios del desarrollo del cerebro, los sectores capaces de recibir información del exterior están estrechamente vinculados a los procesos de estímulo-respuesta programados por la información genética en el sistema nervioso. Esto puede apreciarse especialmente bien en los insectos. Vamos a intentar explicar mediante un ejemplo cómo se da en la práctica esta combinación de circuitos programados e información adquirida.

Las amófilas (avispas de la arena) excavan pequeños agujeros en el suelo y en estos nidos colocan una oruga sobre la que ponen un huevo. Cuando salen las larvas, las avispas las alimentan trayéndoles más orugas. Generalmente cada avispa construye y cuida varios nidos, en cada uno de los cuales se desarrolla una larva.

Si las observamos, podemos damos cuenta de que la avispa es capaz de recordar la situación de sus nidos, puesto que vuelve una y otra vez a ellos sin ningún problema. Si durante la ausencia de la avispa cambiamos la vegetación que crece inmediatamente junto al nido (arbustos, hierbas, etc.) y la trasladamos uno o dos metros más allá conservando su disposición inicial, la avispa al regresar buscará sus nidos en el lugar en donde deberían estar según la disposición de la vegetación, lo que demuestra que la avispa tenía grabada una imagen *óptica* del entorno de sus nidos.

Si seguimos observando sus actividades, veremos que la avispa empieza su jornada con una inspección de sus nidos. Según el estadio de desarrollo de las larvas, la avispa les llevará una o dos orugas o, si están en estadio avanzado, entre siete y diez, y después tapará el nido. Si intervenimos en el proceso retirando de los nidos algunas orugas de las que ha traído la avispa o poniendo más orugas, podremos ver que nuestra intervención no altera en absoluto el programa que la avispa había comenzado a desarrollar por la mañana. Seguirá rigiéndose exclusivamente por la situación que ha registrado en su inspección matinal, sin tener en cuenta ninguna alteración producida posteriormente. Por tanto, la avispa tiene la capacidad de combinar la información sobre la situación de los diferentes nidos y la información sobre el abastecimiento

de cada uno de ellos, y de contar —o al menos de estimar— cuántas orugas ha llevado ya a cada nido. Pero sólo puede informarse, y registrar la información sobre el estado de los nidos, una vez al día. Su comportamiento responde a la existencia de un engranaje que integra las informaciones recibidas del exterior en un programa de comportamiento predeterminado. El esquema siguiente trata de representar esta interrelación de forma simplificada. Las directrices impuestas por el programa genético están representadas por rectángulos; los datos registrados, por círculos.



A partir de este esquema podemos imaginar otras ampliaciones de este programa «mixto». Podríamos ir ampliando las zonas reservadas para el registro de datos, es decir, los secto-

res estructurales «moldeables» del cerebro. Esto haría que la información registrada fuera mucho más completa y variada. Así, los datos registrados para el sentido de la orientación podrían servir para otros fines; ¿Dónde hay un cobijo, agua, alimento? ¿Dónde están mis crías? ¿Dónde me he encontrado anteriormente en peligro?

La selección impulsará la ampliación de la capacidad de registro de la información intelectual y favorecerá una utilización más flexible de la misma. En este proceso evolutivo, el programa rígido de comportamiento predeterminado, que antes resultaba tan ventajoso, irá perdiendo importancia frente a la creciente influencia de los sectores flexibles del registro. De hecho, las normas rígidas pueden convertirse en una especie de «camisa de fuerza» en determinadas situaciones que podrían ser resueltas más ventajosamente por un cerebro «flexible».

Los organismos autómatas han llegado al fin de su apogeo. El sistema de información genética se ha convertido ahora en una ayuda auxiliar del sistema intelectual. Con ello ha llegado a su máxima evolución. Según se vayan ampliando los sectores moldeables, irán aumentando las interrelaciones entre ambos sistemas, y los programas rígidos de comportamiento resultarán cada vez más gravosos. La evolución de la información genética se orientará hacia el desarrollo de la capacidad de registro y hacia una mayor libertad y flexibilidad de acción; es decir, hacia la transmisión de las funciones que hasta ahora dependían de un mecanismo rígido de estímulo-respuesta, a los sectores moldeables del cerebro.

Dentro del estudio del comportamiento de los animales (etología) se ha discutido mucho sobre la distinción de los tipos de mecanismos capaces de desencadenar una respuesta en los animales: ¿Qué son «reflejos»? ¿Qué son «instintos»? ¿En qué se diferencia el comportamiento innato del comportamiento adquirido? ¿Dónde empieza en realidad la actividad de pensar? La dificultad básica estriba en el hecho de que la información genética programa determinados procesos cerebrales en los que hay «espacios libres» que *deberán* ser com-

pletados mediante ciertos estímulos procedentes del medio externo. El ejemplo de la avispa de la arena puede aclararnos este fenómeno. El estado del nido es, evidentemente, una «situación ambiental» que determina el comportamiento de la avispa, pero sólo ejerce su influencia a través del desarrollo de un programa de comportamiento inalterable y genéticamente determinado.

El programa genético y el medio ambiente se hallan estrechamente vinculados. Preguntarse en qué «proporción» se combina el determinismo genético con la influencia ambiental, no tiene sentido, puesto que el funcionamiento de los sectores moldeables y su inclusión en los circuitos neuronales es también consecuencia de una determinada información genética, y porque las facultades más elevadas del cerebro están basadas en una estrecha interrelación de los sistemas genético e intelectual. Debemos tener presente esta interrelación al tratar de clasificar los mecanismos cerebrales y los comportamientos de los animales:

Reflejos: son los casos más simples del proceso automático de estímulo-respuesta. El hombre conserva mecanismos primitivos de este tipo, como el reflejo de succión de los recién nacidos o el reflejo de cerrar los ojos cuando se les acerca un objeto a cierta velocidad.

Instintos: son procesos automáticos mucho más complejos que también están programados en la información genética. A menudo son las circunstancias externas las que activan estos programas. Como hemos podido ver, las circunstancias externas pueden hacer que un determinado programa se desarrolle en una u otra dirección (en el caso de la avispa: «mañana continuar alimentando» o «cerrar el nido»), pero no pueden alterar el programa. Todo comportamiento instintivo se desarrolla como si se deslizara sobre raíles; el medio ambiente puede provocar ocasionalmente cambios de vía.

Las siguientes preguntas pueden revelarnos la dificultad que supone establecer clasificaciones.

Primera: volviendo al símil de los raíles, ¿pueden provocar las condiciones externas cambios de vía permanentes —

tal vez durante toda la vida—, o sólo mientras se desarrolla una reacción concreta? Por ejemplo, la unión a una determinada pareja sexual ¿se establece sólo mientras está activado el instinto de copulación, o puede durar para toda la vida?

Segunda: ¿Basta una única percepción sensorial para que se establezcan cambios de vía de larga duración (o para toda la vida), o es necesaria la repetición de ciertas condiciones externas?

Tercera: Estos cambios de vía ¿tienen que establecerse en una época de la vida del individuo ya determinada en el programa genético? Si, efectivamente, esto ocurre sólo en un período muy limitado de la vida del animal, los etólogos hablan de «impronta». Uno de los ejemplos más claros de este fenómeno es la respuesta de seguimiento de los polluelos de algunas aves. Normalmente esta respuesta es desencadenada por la visión de la madre, pero también puede ser provocada por un biólogo barbudo que esté en el lugar apropiado en el momento preciso.

Cuarta: Si las repeticiones desempeñan algún papel, sobre todo las repeticiones que se producen constantemente en un medio ambiente natural, ¿cómo podemos distinguir entre el «aprendizaje» y ejercitación de determinada respuesta, y el simple proceso de maduración automática independiente de las percepciones externas? ¿Qué factores ambientales son necesarios para que se produzca esta maduración? ¿Es, por ejemplo, el torpe vuelo de un ave joven sólo un síntoma de inmadurez, o es que realmente necesita adquirir experiencia para poder volar bien? Si se le impide hacerlo hasta que se haya desarrollado por completo, ¿dominará la técnica del vuelo sin necesidad de haberla ejercitado? Los experimentos realizados demuestran que no es imprescindible una práctica previa para que el ave pueda volar, pero sí para que sea capaz de dirigir su aterrizaje hacia un lugar determinado. Sin embargo, la adquisición de esta facultad está posibilitada por la existencia de una serie de circuitos neuronales determinados genéticamente. Puede hablarse de «aprendizaje» cuando se trata, en realidad, del desarrollo de facultades para las que el animal tiene una predisposición innata determinada por cir-

cuitos neuronales codificados en su información genética En el adiestramiento de animales habrá que distinguir si lo que se hace es asociar un nuevo desencadenante a un programa determinado genéticamente, o establecer una pauta de comportamiento completamente nueva. Pero ¿qué significa «completamente nueva»?

Por último, también en nosotros mismos podemos comprobar que, mediante una intensa práctica, es posible que algo aprendido se convierta en algo automático muy parecido a un reflejo. Escribir a máquina o conducir, son ejemplos de esta clase de aprendizaje. Nuestro programa genético permite que el comportamiento aprendido se grabe de un modo tan profundo en el cerebro, que las conexiones establecidas llegan a funcionar como si se tratara de un reflejo.

Las múltiples capacidades del sistema nervioso central —independientemente de como queramos clasificarlas— están basadas en una interrelación entre circuitos neuronales determinados genéticamente y los «engramas» creados por los estímulos del medio ambiente. A lo largo de la evolución la selección natural favoreció la ampliación de la capacidad de registro del cerebro y fomentó la flexibilidad de las reacciones, de forma que cada vez fueron más los factores externos a tener en cuenta en procesos cerebrales cada vez más complejos. Y éste es precisamente el avance decisivo que conduce a la aparición del hombre sobre la Tierra.

18. LOS ELEGIDOS

> «En la naturaleza todo está vinculado; un estadio tiende hacia otro y le prepara el camino. Cuando la aparición del hombre cerró la cadena de la evolución en la Tierra, como último eslabón, fue a la vez el comienzo de una cadena de seres superiores y también, probablemente, la anilla que unió dos sistemas de desarrollo entrelazados entre sí.»
>
> J. G. HERDER

La evolución es la historia de la propagación de las estructuras. La fase biológica es la historia del perfeccionamiento de la autoduplicación, es decir, de la reproducción y proliferación de estructuras genéticas. Con el surgimiento de un segundo sistema de información, el desarrollo de las estructuras se orienta hacia la transmisión y el perfeccionamiento de las estructuras intelectuales, o sea, de las estructuras neuronales de los cerebros. Eso se realiza a través de la (comunicación} El presente capítulo trata de los comienzos del nuevo principio para el desarrollo de las estructuras.

La comunicación se inicia al principio de una nueva integración: la integración del animal individual en grupos, enjambres, bandadas, manadas o rebaños:

$$\cdots \int \text{animales} \rightarrow \text{grupo}$$

Desde sus comienzos la reproducción sexual exigía mecanismos que, al menos durante la época de apareamiento, despertaran el instinto de unirse a una pareja sexual. Más tarde surgiría también el instinto de proteger a las crías, lo que en muchas especies haría que los padres permanecieran juntos hasta que los polluelos o cachorros pudieran valerse por sí mismos. Proteger a las crías era tan ventajoso ante la selec-

ción natural que este comportamiento pronto se perfeccionó y se grabó como instinto (en la información genética de muchas especies.

Además era frecuente que los individuos de una misma especie coincidieran en determinadas situaciones, atraídos por una fuente de alimentación o por un abrevadero. De esta forma, la agrupación de individuos fue fomentándose porque suponía una ventaja frente a la selección. Los circuitos neuronales causantes de este instinto gregario también eran ventajosos ante la selección, Además, el grupo ofrecía mayores posibilidades de protección contra los enemigos. Todos los animales que viven en manada tienden a huir cuando uno de ellos emprende la huida bruscamente. El grito de terror de uno de ellos se convierte en señal de alarma para los demás; esta señal puede también afectar incluso a otras especies. Varios pares de ojos ven mucho más que uno. Por eso, la mayoría de las veces, un predador que ataque a un grupo sólo consigue hacer presa en individuos enfermos o viejos; sobre todo cuando la estructura del grupo incluye medidas de protección a las crías. La agrupación supone más posibilidades de defenderse. Un ataque conjunto de muchos individuos débiles puede ahuyentar a un enemigo fuerte; al igual que una manada de predadores tiene más posibilidades de acorralar a la presa que un solo individuo.

Pero la cosa no es tan sencilla, puesto que si fuera así, todos los animales superiores vivirían en grandes grupos. En realidad, existen muchas especies que sólo se agrupan en la época del apareamiento, defendiendo enérgicamente su territorio; así, los machos de algunas especies marcan su territorio e impiden la entrada a otros machos de la misma especie. Las ventajas que ofrece la agrupación frente a la selección son muy diferentes según la forma de vida, enemigos y fuentes de alimentación de las especies. Probablemente la alimentación es el factor principal. En las especies nómadas, que van de un sitio a otro buscando su alimento (como, por ejemplo, las cebras o las golondrinas), la selección natural favorece la formación de grupos. Sin embargo, en el caso de los animales que viven en un sitio fijo y que se alimentan de otros animales

determinados, la competencia para la obtención de alimentos es tan fuerte, que los individuos marcan sus territorios y los defienden tenazmente.

Ante las ventajas y desventajas que ofrece el agolpamiento o la separación, la búsqueda de la distribución óptima para la conservación de la especie puede llevar a soluciones de compromiso, como la formación de grupos pequeños con un territorio común a defender contra otros grupos. Estos grupos pequeños serán el punto de partida de una futura evolución.

Las grandes agrupaciones (por ejemplo, los bancos de arenques o las bandadas de flamencos) son asociaciones *abiertas*. El número de miembros es tan elevado qué tal vez solo llegan a conocerse íntimamente las parejas sexuales. Cualquier miembro de la misma especie puede unirse a estas asociaciones abiertas. Pero, a lo largo de la evolución, el grupo *cerrado* fomenta un mayor desarrollo del cerebro. Sus miembros se reconocen unos a otros por el olor o por otros distintivos, e impiden que otros individuos de la especie, ajenos al grupo, puedan asociarse a ellos. Los lobos y las ratas nos proporcionan ejemplos de sociedades cerradas. En las sociedades altamente organizadas de mamíferos, los miembros del grupo se conocen de forma *individual* y generalmente establecen un orden jerárquico encabezado por un jefe.

Ahora los miembros del grupo no son sólo aliados, sino que además compiten entre ellos por la hembra deseada, el alimento o el lugar de reposo. Surgen entonces señales de amenaza y agresividad que anuncian la disposición a la lucha, y también otras que sirven para demostrar aceptación y sumisión. Estos códigos de comportamiento suponen una ventaja ante la selección. Una lucha encarnizada pondría en peligro la vida de los contrincantes y amenazaría a la especie. Así, prácticamente todas las señales que los animales emplean para comunicarse sirven, o bien para anunciar un peligro, o para relacionarse con sus congéneres. Muchas especies superiores disponen de un gran repertorio de señales que emiten y «comprenden», lo que les permite adoptar comportamientos útiles para la supervivencia de la especie.

Una estructuración social de este tipo tiene siempre su base en los sectores moldeables del cerebro, capaces de registrar las experiencias obtenidas de anteriores conflictos entre los individuos. Los miembros del grupo se conocen; saben quién es el más fuerte y, por tanto, no hay necesidad de comprobar este hecho continuamente. De este modo, las sociedades de los animales superiores son el resultado de la interacción de factores heredados y aprendidos, de la combinación de los circuitos neuronales determinados por la información genética con posteriores «engramas» desarrollados en estos circuitos. La experiencia individual irá adquiriendo cada vez más importancia a lo largo de la evolución, y conducirá gradualmente a una mayor diferenciación de las estructuras sociales. Pero las experiencias más complejas se desarrollan a nivel individual; cada individuo tiene que ir adquiriendo y acumulando las suyas. Todavía no se ha logrado que la información intelectual registrada pueda ser transmitida a otros individuos. ¿Cómo puede realizarse esto? ¿Cómo pueden transmitirse los engramas de cerebro a cerebro, y no sólo a la propia descendencia, sino también a los demás miembros del grupo, sean o no parientes, jóvenes o viejos? Si esto llegara a hacerse posible supondría un gran beneficio para toda la especie, y la experiencia individual no desaparecería con la muerte del individuo.

Ahora todo parece apuntar hacia el surgimiento del lenguaje. Sin embargo, la evolución resolvió inicialmente el problema mediante un «truco» bastante sencillo; este truco no sólo fue una «solución de emergencia», sino que constituyó una condición indispensable para el desarrollo del lenguaje. Y la solución fue utilizar un instinto que ya estaba grabado en la información genérica: el instinto de imitación. No es sorprendente, por tanto, que encontremos este instinto sólo en los animales superiores, y que sea mucho más pronunciado en los monos y el hombre.

Sin lugar a dudas, la imitación de cualquier acto o de un determinado comportamiento requiere la existencia de un cerebro altamente diferenciado. Los movimientos de otro

individuo han de ser observados cuidadosamente y, en el intento de imitarlos, traducidos a movimientos precisos. En la fase de entrenamiento, el animal tendrá que ser capaz de comparar los resultados obtenidos con el modelo, y corregirlos hasta lograr la perfección.

El ejemplo que referimos a continuación puede ilustrarnos sobre la gran repercusión del instinto de imitación: desde hace unos treinta años, en Inglaterra —y también en otros países— se utilizan botellas de leche que cierran mediante una tapa de papel de aluminio. Los lecheros dejan las botellas cada mañana delante de las puertas. Por casualidad, un buen día un pájaro carbonero tuvo la ocurrencia de perforar con el pico la tapa de una de estas botellas de leche, y se bebió la crema de la leche, que se acumula precisamente en la parte superior de la botella. Seguramente volvería a ejecutar esta acción y sería observado por otros carboneros, puesto que al cabo de pocos años esta costumbre se había extendido entre todos los pájaros carboneros de las comarcas vecinas.

Hubiera resultado prácticamente imposible para un pájaro carbonero comunicar a sus congéneres mediante señales que bajo las relucientes tapas de las botellas blancas podrían hallar un exquisito manjar. Pero a pesar de esto, la experiencia registrada en el cerebro de este carbonero pudo ser transmitida a los cerebros de muchos de sus congéneres. El instinto de imitación hizo posible el milagro.

Sin embargo los más hábiles en el arte de la imitación son precisamente los parientes más cercanos del hombre. Los monos se imitan unos a otros, y también son capaces de imitar nuestros actos sin haber sido adiestrados para ello. En algunas sociedades de monos, la observación sistemática de su comportamiento permite descubrir «tradiciones» particulares que no se dan en otras sociedades. Las experiencias casuales se van transmitiendo por imitación —ya no a través de la información genética— a los demás miembros del grupo.

Así pues, los descubrimientos casuales se transmiten a todos los miembros de la especie. Por ejemplo, en una colonia de monos que habita en las costas del Japón *(Macaca fuscata)*, que era alimentada regularmente con boniatos, un buen

día, en 1945, a una hembra joven se le ocurrió lavar un boniato antes de comérselo para quitarle la tierra. Con sumo cuidado sumergió el boniato en el agua y le quitó toda la tierra que tenía adherida a su superficie. No hizo falta mucho tiempo para que otros individuos, especialmente los jóvenes, la imitaran. Hoy toda la colonia de monos lava los boniatos antes de comérselos.

Esta misma hembra —especialmente creativa, por lo que se ve— hizo en 1956 otro descubrimiento. La colonia era alimentada entonces con maíz, y los animales tenían que recoger fatigosamente los granos esparcidos por la arena. A la mona se le ocurrió coger la arena mezclada con los granos de maíz a puñados y depositarla en el agua para recoger después los granos, que quedaban flotando en la superficie. También este truco se difundió muy pronto entre sus congéneres.

Los animales superiores tienen además otro instinto muy importante que comparten con el hombre: la curiosidad. Todo lo que aparece por primera vez en su entorno es observado cuidadosamente; primero con aprensión y después con todo detenimiento. De esta forma se utiliza y se aprovecha al máximo la capacidad de registro del cerebro. Experimentar jugando conduce a nuevos y provechosos conocimientos.

Vemos, pues, que incluso sin la existencia de un lenguaje pueden asimilarse las experiencias ajenas; si existe la suficiente curiosidad el individuo observa lo que hacen otros y lo repite. Las crías aprenden así de la madre o de otros animales del grupo. También para los niños pequeños, la curiosidad y el instinto de imitación son factores de extrema importancia en su aprendizaje. El instinto —determinado genéticamente— de imitar las acciones de los mayores y de probarlo todo afecta también a la facultad del lenguaje. Sin el instinto de imitación ningún niño llegaría a aprender a hablar. Según se fue desarrollando la capacidad de registro e imitación, los factores que hasta entonces habían sido importantes para la selección que impulsaba la evolución de los animales superiores, como la velocidad, la fuerza física, el número de descendientes, etc., fueron perdiendo su significado. Ahora son la capacidad de aprender de otros miembros de la especie, la armonía

de la estructura interna del grupo y la cooperación, los factores que favorecen la supervivencia de la especie. Para que el grupo no sucumba a las agresiones de otros grupos o especies, lo más importante es disponer de un cerebro ágil, y esto requiere el cuidado y el adiestramiento de las crías. El cerebro se ha convertido en la carta de triunfo.

En determinado momento, hace ahora entre dos y cinco millones de años, unos monos antropoides africanos se convirtieron en hombres.

¿Cómo establecer la frontera que separa al mono del hombre?

¿Cuáles son las características que diferencian al hombre del animal?

¿Qué es exactamente lo «humano» en el hombre?

¿El asesinato premeditado de sus congéneres?

¿Su andar erguido?

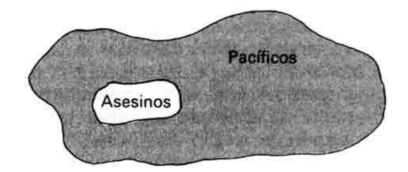
¿Los utensilios que utiliza?

¿El lenguaje?

Esta transición no es un salto evolutivo. Ninguna de las características del hombre pudo producirse de la noche a la mañana, y ninguna de ellas pudo ser la responsable de un desarrollo acelerado. Pero es muy difícil descartar la hipótesis de que los hombres, a través de luchas entre ellos y por medio del exterminio de los grupos derrotados, se convirtieron en el instrumento más importante de su propia selección; lo que tuvo como consecuencia un rápido desarrollo de su cerebro. Veamos cómo pudo llegarse a esto.

En todo el reino animal se producen luchas entre los miembros de una misma especie. Generalmente el más débil suele retirarse y su huida pone fin a la pelea. Los animales superiores han desarrollado además ciertas pautas de conducta para manifestar su sumisión, que inhibe la continuación de la lucha por parte del vencedor. A consecuencia de esto, el asesinato de miembros de la misma especie sólo se produce en el reino animal de modo involuntario, por accidente.

De todos modos, la lucha a vida o muerte no es privilegio exclusivo del hombre. Por ejemplo, los leones machos que han conseguido arrebatar sus hembras a un rival más viejo pueden llegar a matar a todos los descendientes de éste. Las águilas suelen poner dos huevos y, sin embargo, sólo crían un polluelo. Los dos polluelos se enzarzan en una lucha a muerte ante la mirada indiferente de los padres. Las abejas matan a cualquier intruso que penetre en su colmena, tras detectarlo por el olor. ¿Cómo podría explicarse este comportamiento? ¿No es perjudicial para toda la especie la eliminación de congéneres? Y, además, ¿no es esto una violación de las leyes que rigen la selección natural? Para poder aclarar esta aparente contradicción tendremos que profundizar un poco más en el tema.



Imaginemos una especie animal ampliamente difundida. Esta especie puede alimentarse de plantas o de otros animales y, a su vez, será alimento para otras especies. La selección se habrá encargado de grabar en su información genética la inhibición de matar a sus congéneres. Sin embargo, su patrimonio genético estará expuesto a constantes mutaciones, la mayoría de las cuales serán de efecto negativo. Por tanto, se producirán mutantes capaces de desarrollar una agresividad desenfrenada contra sus congéneres. Estos «mutantes erróneos» se darán, en principio, en una zona restringida. Si comparamos el número de descendientes que se da en una de estas «zonas de asesinos» podremos observar que, puesto que sus miembros se aniquilan mutuamente, esta comunidad se reproduce menos que una población «pacífica», que sólo estará amenazada por factores externos. El grado de reproducción de los asesinos significa también su gradual extinción; por tanto, *los animales pacíficos se verán favorecidos por la selección.*

Así pues, podríamos decir que en cualquier especie pueden producirse por mutación variaciones agresivas del comportáis miento, pero que éstas sólo tendrán una existencia *efímera*.

Pero existen también los «elegidos», los «reyes» de los animales, que devoran a otros animales para alimentarse sin ser presa de ningún otro animal, ni siquiera cuando son cachorros, gracias a la protección de los padres. Para estas especies que ocupan la cúspide de la pirámide de alimentación, rigen unas leyes de selección distintas que para los demás animales. Para ellos una tasa de reproducción elevada no es ninguna ventaja. Lo único que puede amenazar su existencia es una crisis de hambre; y esto será inevitable si su reproducción es excesivamente rápida. Con la disminución del número de los animales que les sirven de presa, esta especie quedaría también al borde de la extinción. De ahí que una reproducción rápida sólo sea una ventaja frente a la selección cuando hay un predador que mantiene en equilibrio la densidad de población.

Así, cuando las especies animales que coronan la cadena alimentaria experimentan mutaciones que implican una disminución de su tasa de reproducción (y estas mutaciones «negativas» se producen continuamente en todas las especies), esto no significa una desventaja frente a la selección mientras el número de crías siga siendo suficiente para perpetuar la especie. Al contrario, una tasa de reproducción baja evitará las crisis de hambre y, por tanto, el riesgo de repetidas crisis de mortalidad que reduzcan drásticamente el número de miembros de la especie.

Además, si el número de crías es reducido, los padres pueden atenderlas con mayor dedicación, lo que resulta de esencial importancia, puesto que favorece la transmisión de los conocimientos adquiridos por experiencia. De la suma de todos estos factores resultará un equilibrio en la reproducción que mantendrá constante el número de miembros de las especies de «elegidos».

Hay diferentes medios que frenan la tasa de reproducción como, por ejemplo, el aumento de la edad de la madurez

sexual. El hombre necesita generalmente unos 15 años, mientras que otro mamífero, el ratón, alcanza su madurez sexual a las 9 semanas de vida. Las hembras del ratón pueden ser fecundadas nada más nacer; en cambio, una hembra de chimpancé tiene que tener tres años para poder engendrar. La gestación de los ratones dura sólo tres semanas, y el número de crías por parto se sitúa entre tres y diez. En cambio, una elefanta sólo puede traer al mundo unas cuatro crías en toda su vida, y el período de gestación para cada una de ellas es de un año y nueve meses.

Otro medio diferente de impedir la superpoblación es el asesinato entre miembros de una misma especie. En las especies elegidas —y sólo en ellas— una mutación negativa que altere el comportamiento en este sentido puede llegar a establecerse definitivamente. Sin embargo, incluso en este caso, el instinto asesino tiene que mantenerse dentro de ciertos límites, desencadenarse sólo en ciertas situaciones o estar dirigido exclusivamente a determinados congéneres. Una población mutante capaz de matar desenfrenadamente a *cualquier* congénere quedaría automáticamente condenada a la autoextinción. Sin embargo, el asesinato limitado es admisible biológicamente y, coordinado con otros factores que regulan la tasa de reproducción (edad de la madurez sexual, período de gestación, número de crías por parto, intervalo entre gestaciones, etc.), puede contribuir al establecimiento de una densidad de población más o menos constante.

Una vez que el asesinato llega a convertirse en un factor estable, pasa a ser un nuevo instrumento de la selección, puesto que serán siempre los individuos más fuertes, más ágiles y más inteligentes los que consigan sobrevivir. Esto contribuirá a fomentar la superioridad de la especie. El instinto asesino, que en principio es una regresión (como la desaparición de la pigmentación en los animales de las cavernas, por ejemplo), se ha convertido en un factor que potencia la evolución de la especie. El hombre pertenece también a las pocas especies elegidas. Sus sociedades primitivas carecían prácticamente de enemigos naturales. Así que el hombre —cuya inteligencia le había liberado de la amenaza de otras especies enemigas— se

convirtió en su propio enemigo. Este proceso estuvo favorecido por determinados factores inherentes a sus nuevas facultades:

Las armas —aunque primitivamente sólo se tratara de piedras lanzadas voluntariamente hacia determinado blanco— le ayudaron a matar a los animales de otras especies con mucha más rapidez y eficacia que sus armas naturales: uñas y dientes. Además hicieron posible matar a distancia y, por tanto, ya no hubo oportunidad de inhibir su capacidad de matar mediante las manifestaciones de sumisión previstas en su información genética.

Además, con el aumento de sus facultades cerebrales, las reacciones de los animales superiores pasaron de ser procesos automáticos de estímulo-respuesta, a convertirse en complejas pautas de comportamiento instintivo. Según fue adquiriendo más importancia la experiencia personal del individuo a la hora de tomar decisiones, las reacciones instintivas fueron siendo desplazadas. Cuando, finalmente, la facultad de hablar permitió consolidar una experiencia común de grupo, las reacciones instintivas, basadas en la información genética, fueron perdiendo su valor frente a la selección, siendo progresivamente reemplazadas por pautas de comportamiento más flexibles derivadas de un proceso cerebral que combina y procesa las tradiciones sociales, las experiencias individuales y la situación concreta que producía el estímulo. Cuanto menor era la influencia de la información genética, mayor era el margen de libertad del cerebro, y mayores las posibilidades de supervivencia del grupo. De esta forma, la selección fue eliminando los controles genéticos desencadenados de instintos en el comportamiento humano, en favor de un control intelectual basado en las «costumbres». Esta tendencia es fundamental para el surgimiento del hombre propiamente dicho, aunque todavía ahora el ser humano se vea en ciertas ocasiones afectado por comportamientos instintivos.

El lenguaje fue sustituyendo los gestos y la mímica sobre todo en el campo de las pautas de comportamiento destinadas a manifestar la agresividad o la sumisión. Dentro del grupo social existía un lenguaje comprendido por todos sus miem-

bros; pero el que no fuera capaz de hablar, el que sólo consiguiera emitir sonidos incongruentes, simplemente no era considerado «hombre». Con los «hombres» era posible hablar, entenderse. El que utilizara un lenguaje diferente no podía pedir misericordia. El lenguaje se había convertido en el vínculo de unión esencial de las sociedades primitivas. Cualquier mono podría parecer un hombre, pero hablar... eso ya era otra cosa.

Presumiblemente, esta nueva facultad establecería un límite a la hora de determinar a quién se podía matar y a quién no. Los extraños no pertenecían en realidad a la propia especie. El lenguaje común fue una experiencia nueva y especialmente intensa del sentido de pertenencia. Pero cuanto mayor es la cohesión interna de un grupo, más fácil es que todo lo externo al grupo sea considerado como enemigo.

No sabemos, y probablemente nunca lo llegaremos a saber, si el lenguaje surgió una sola vez —es decir, si fue un «invento» único, un lenguaje primario del que se derivarían después todas las demás lenguas— o si fue un fenómeno que se produjo en diversos grupos sociales, genéticamente similares, y que dio lugar, desde un principio, a diferentes lenguas. Es muy probable, sin embargo, que la diferenciación se produjera en un proceso gradual, y que al principio no existiera una distinción completamente clara.

Además, sea como fuere, un lenguaje primitivo único hubiera tendido enseguida a dividirse en diferentes sublenguajes o dialectos. El número de agrupaciones humanas era reducido y estaban distribuidas en tribus de unos 10 a 100 miembros. Los grupos más numerosos no podrían encontrar suficiente alimento en su entorno y tendrían que disgregarse. La comunicación mediante el lenguaje se limitaría básicamente a los miembros de una misma tribu, a excepción de algún encuentro ocasional con otras tribus. Esto provocaría que un lenguaje original se ramificara rápidamente en varios dialectos. También actualmente los diferentes grupos sociales —ya sean rockeros o científicos— tienden a desarrollar su jerga, que sólo es comprendida por los miembros del grupo que la utili-

za. Y también actualmente la lengua constituye un fuerte vínculo, o. visto de otra forma, un medio de aislamiento de todo lo que es externo a una comunidad lingüística determinada. La lengua, como tradición tribal, fomentó el aislamiento de los numerosos pequeños grupos. El individuo sentía un vínculo de pertenencia hacia la propia tribu y, en el mejor de los casos, tal vez hacia otras tribus vecinas que hablaran la misma lengua; todo lo demás era el mundo exterior.

La pareja sexual era casi siempre miembro de la propia tribu. Las tribus constituían, pues, comunidades cerradas e incestuosas, en las que las mutaciones positivas tendrían más posibilidades de prevalecer a lo largo de las generaciones que en grandes poblaciones (hay que recordar además que estas mutaciones en principio serían «neutras» para la selección). Este efecto fue reforzado por el «dominio de un jefe». En la mayoría de los casos eran sólo unos pocos hombres los que podían procrear, o incluso uno solo.

De este modo, el lenguaje sirvió de instrumento para fomentar lo que hasta entonces sólo se había producido por separación geográfica: el aislamiento de numerosas subpoblaciones; tribus compuestas por unas cuantas familias vecinas que se desarrollaban independientemente, y que legaron a sus descendientes un patrimonio genético e intelectual propio y diferente. La división lingüística provocó sangrientas luchas que hasta entonces no se habían conocido entre miembros de una misma especie. Sólo los más inteligentes consiguieron sobrevivir, aunque esto implicara a veces la huida a territorios menos propicios, que exigirían un mayor esfuerzo y cooperación.

Sólo ocasionalmente llegaba a producirse una fusión entre dos tribus, quizá porque ambas hubieran quedado mermadas por alguna catástrofe natural, o quizá porque los vencedores hubieran acogido en su tribu a los niños y mujeres de los vencidos. Estas fusiones podían tener como consecuencia una combinación favorable de ambos patrimonios genéticos; así, mediante la episexualidad (véase el capítulo 15) se aceleraría enormemente la evolución del ser humano.

La tribu más inteligente tenía más posibilidades de sobrevivir. Sus miembros podían ya comunicarse intensivamente; sus utensilios y sus armas eran mucho más efectivos. Su capacidad de previsión estaba mucho más desarrollada, lo que favorecía la capacidad de sobrevivir en ambientes menos favorables. El propio hombre aceleró la selección de los mejores cerebros. Desde entonces sería ya la comunicación hablada lo que permitiría alcanzar una cooperación organizada, lo que haría posible que los viejos transmitieran sus experiencias a los jóvenes, y lo que crearía vínculos de pertenencia entre los miembros de una misma comunidad lingüística. Quien habla como nosotros pertenece a nuestro grupo.

Así pues, el lenguaje tuvo una doble repercusión sobre nuestra base genética: primero, contribuyo a desinhibir el instinto asesino contra los miembros de la misma especie, estableciendo un vínculo intelectual más fuerte entre determinados individuos, lo que suponía no reconocer como igual a quien no hablara la misma lengua; segundo, contribuyó a estabilizar diferentes poblaciones incestuosas, que constituyeron el punto de partida para una episexualidad, sin que para esta diferenciación fuera necesaria una estricta separación geográfica. Estos dos factores, conjuntamente, pueden explicar la rápida evolución del género humano, sobre todo en comparación con todas las demás especies similares. Nadie sabe cómo llegó a originarse el lenguaje. Tal vez, al principio no fuera más que una mezcla de mímica, gestos y sonidos inarticulados. Palabras como «agua», «antílope» o «niño» tuvieron que ser *pensadas* antes de poder ser *articuladas*. Los conceptos tenían que estar ya presentes en muchos cerebros. También el cerebro del chimpancé es capaz de elaborar conceptos, pero este animal no posee los órganos de fonación adecuados para vocalizar los sonidos. Los chimpancés nunca podrán aprender a *hablar*.

Pero existieron homínidos con un desarrollo cerebral similar al del chimpancé que, por mutaciones fortuitas, desarrollaron órganos de fonación capaces de articular sonidos. Al regresar a la tribu después de una cacería, estos homínidos podían emitir sonidos que despertaran en todos los demás

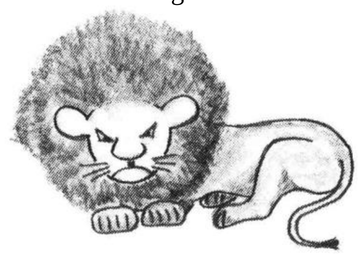
cerebros la imagen o idea de «antílope». Así, determinados sonidos comenzaron a activar los engramas cerebrales vinculados a la experiencia individual de «antílope». Al oírlos era como si los receptores pudieran visualizar la imagen del antílope. El resto de la tribu empezaba con los preparativos para la comida trayendo leña y encendiendo el fuego.

En algún momento de la oscura prehistoria de la tribu se asociaron ciertos sonidos al concepto «antílope». Cada vez que los cazadores volvían a la tribu arrastrando su presa y, en su júbilo, emitían los sonidos que correspondían a la idea de «antílope», todos lo entendían, y la conexión entre los símbolos sonoros y el concepto se iba reforzando cada vez más. Los padres transmitían a sus hijos esta interrelación. El lenguaje había iniciado su marcha triunfal.

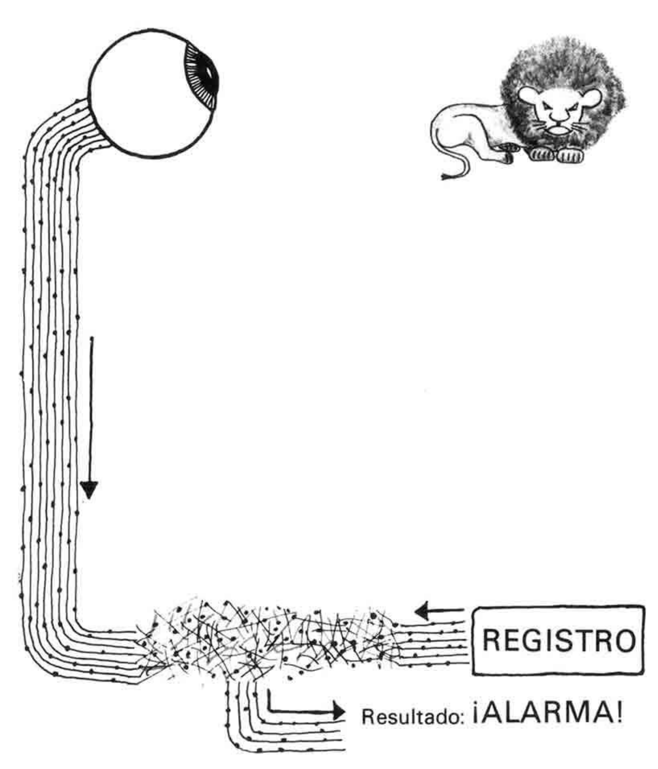
El lenguaje es instrumento de la integración intelectual. En esta integración ya no se trata de aumentar las posibilidades y ampliar las estructuras genéticas; por primera vez, se trata de perfeccionar la ampliación de las estructuras intelectuales, es decir, de posibilitar que los engramas del cerebro del emisor puedan transmitirse y grabarse en los cerebros de los oyentes. Por tanto, la comunicación —es decir, el intercambio de señales, de informaciones intelectuales— constituye el vínculo entre las diferentes partes de la nueva unidad.

Resulta fascinante ver cómo en la red neuronal del cerebro humano unas asociaciones conducen a otras. Se desencadenan así secuencias de conceptos vinculados que pueden transmitirse de un cerebro a otro mediante la comunicación Consideremos este fenómeno basándonos en un ejemplo concreto:

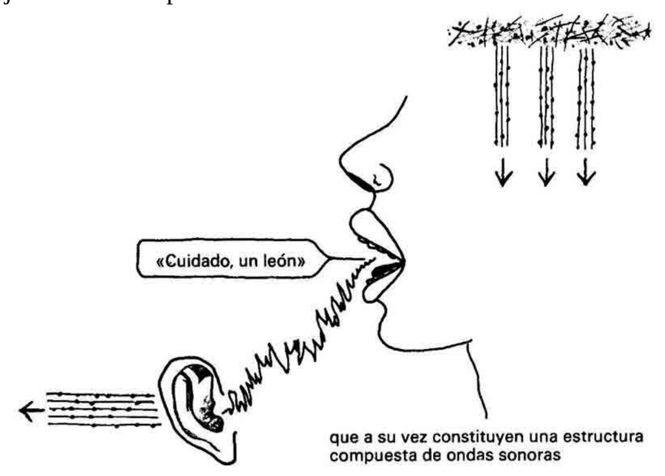
He aquí un león tumbado; una realidad de carne y hueso, una gigantesca estructura biológica.



Su imagen se refleja en la retina del ojo de un ser humano, en donde es transformada en estímulos nerviosos (puntos grises) y transmitida a través de un grueso haz nervioso, compuesto por cerca de un millón de axones, hasta el cerebro. Lo que es transmitido desde el ojo hasta el cerebro es un estructura espacio-temporal que no tiene la más mínima semejanza con la figura del león, sino que es una estructura modificada de su imagen. Al llegar al cerebro estas señales activan todo un arsenal de neuronas, como si encendieran unos fuegos artificiales. La imagen así asimilada es inmediatamente comparada con el catálogo de informaciones registradas:



La estructura ha sido identificada como «león». A través de conexiones laterales este concepto se encuentra asociado al de «máximo peligro» y también al de «¡Alarma general!» (es interesante observar que este resultado no se produciría en un zoo o en una juguetería, lo que viene a demostrar que al procesar la información se toman en cuenta otros tipos de experiencias), o Indudablemente es un instinto atávico lo que impulsa al que percibe la imagen del león a comunicar lo que ha visto para dar la alarma a sus compañeros. La percepción sensorial procesada por el cerebro hace que en el centro del lenguaje se activen otras neuronas. Éstas envían una serie de impulsos motores coordinados a la lengua, labios, laringe y pulmones que, respondiendo a estos impulsos, producen conjuntamente las palabras:



Y estos sonidos desencadenan, a su vez, otras secuencias de estímulo-señal que serán transmitidas desde el oído al cerebro. Pese a que las diferentes señales son transmitidas por circuitos neuronales diferentes, el cerebro llegará al mismo resultado: «¡Un león, alarma!»

León: toda una serie de actividades de las neuronas en el cerebro, activación de los mecanismos del lenguaje, ondas

acústicas... Una cadena de estructuras transformadas activada por una sola estructura: la de la realidad *león*.

La denominación *Homo sapiens* es errónea en realidad. El hombre sólo llegó a adquirir su sabiduría como miembro de un grupo social, a través del lenguaje que permitía la transmisión de estructuras de un cerebro a otro. Una denominación más apropiada para nuestra especie hubiera sido *Homines sapientes*, o sea, la misma, pero en *plural*. Gracias al lenguaje, una especie animal había llegado a formar un «aglomerado» con nuevas capacidades; había comenzado la integración del hombre y la formación de sociedades humanas.

19. EL LENGUAJE: UNA ESTRUCTURA COMPUESTA POR CONCEPTOS

«El orden y la vinculación que existen entre las ideas son los mismos que los que existen entre las cosas.»

SPINOZA

El nuevo sistema de información intelectual es más eficiente y ágil que el antiguo sistema de información genética. Posee mayor capacidad y facilidad para ampliarse, corregirse o modificarse. Quien es capaz de comprender un lenguaje participa en el creciente tesoro de información descubierto por el hombre. El lenguaje ha abierto una puerta hacia un nuevo mundo de relaciones entre las estructuras. Pero, ¿qué es el lenguaje? ¿Podemos decir algo sobre este fenómeno cuando aún no sabemos cómo se «piensa»? O. generalizando aún más, ¿cómo funciona nuestro cerebro? Tal vez seamos capaces de decir algunas cosas. Como dijimos en el capítulo 5, el lenguaje es también una estructura; algunos lingüistas han llegado a compararlo con un sistema de moléculas químicas. Los elementos básicos del lenguaje son los conceptos, simbolizados por las palabras. Al igual que en cualquier otra estructura, en el lenguaje se dan una serie de interrelaciones o interdependencias de sus componentes básicos. Las palabras que forman una frase no son colocadas una al lado de otra sin orden ni concierto; la frase exige que exista una determinada relación entre los símbolos empleados. Es la interdependencia entre sus componentes lo que hace del lenguaje una estructura.

Queremos ir avanzando gradualmente en el estudio del fenómeno del lenguaje y comenzaremos por la semántica, es decir, por el estudio de la relación entre concepto y palabra; entre significado y significante. Para ello tendremos que considerar los elementos básicos de la estructura que es el len-

guaje. No es tarea fácil, puesto que los componentes básicos, las palabras, están estrechamente vinculadas al funcionamiento del cerebro humano, que aún no conocemos con suficiente profundidad.

Para poder atribuir un significado a la secuencia de sonidos que constituye una palabra, es necesario que el concepto ya exista en el cerebro. Por tanto, nuestra primera pregunta no se relaciona directamente con el lenguaje, sino con el funcionamiento del cerebro humano: ¿qué son y cómo se elaboran los conceptos?

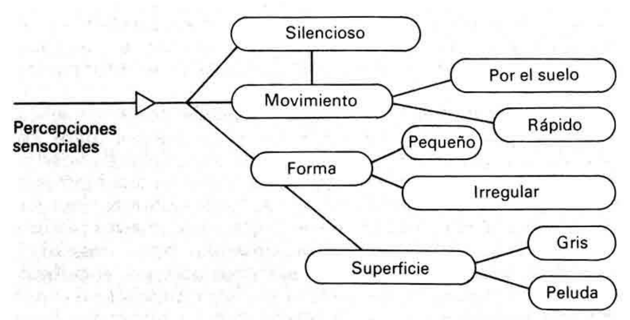
La respuesta que proponemos no puede proporcionamos más que algunas ideas que no están aceptadas por todos los científicos, y que no pueden ser demostradas a la luz de nuestro actual nivel de conocimientos. Se trata, pues, de una hipótesis:

A través de los órganos sensoriales (principalmente, los ojos y los oídos, aunque también otros) llegan hasta nuestro cerebro señales que configuran una «representación» transformada del medio ambiente. Estos estímulos son ordenados por el cerebro y finalmente registrados en la memoria. Los estímulos son canalizados, ramificados y vueltos a unir a través de diferentes conexiones de los circuitos del sistema nervioso, en una serie de actividades neuronales increíblemente complicadas. El plano general que determina estas ramificaciones —que efectúan la descomposición de las informaciones— está ya codificado en la información genética heredada por la persona, o ha sido impreso en parte por anteriores percepciones sensoriales. A través del sistema de circuitos y conexiones de la red de neuronas, los estímulos son «procesados y separados en diversos componentes» en un proceso de fases consecutivas. Esto significa, por ejemplo, que determinados sectores del sistema nervioso sólo se activan cuando en el medio externo se produce un movimiento; otros sólo se ponen en funcionamiento cuando en el campo de visión aparecen unas líneas horizontales; y otros, tal vez sólo cuando el color «rojo» aparece en el objeto percibido.

El proceso, el plano de conexiones y la recepción de estímulos son tan complejos que nuestros sencillos ejemplos sólo

pueden damos una vaga idea de lo que en realidad ocurre en nuestros cerebros. Sin embargo, lo esencial en el procesamiento de estímulos es la descomposición multifásica del mundo percibido en una gran variedad de componentes, que, distribuidos por la red nerviosa como estímulos parciales, activan el funcionamiento de determinados circuitos neuronales.

Para hacer más comprensible el funcionamiento básico del cerebro, presentamos un esquema como ejemplo de la descomposición en elementos de una percepción sensorial:

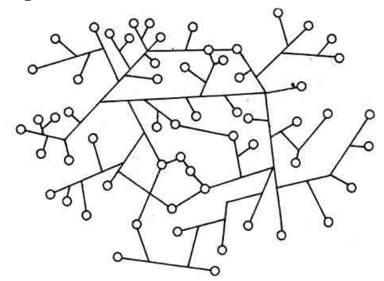


Quien, tras contemplar este esquema, haya pensado «ratón», ha comprobado por sí mismo que el ratón está representado en nuestros cerebros por un conjunto de componentes individuales. Una activación de este tipo de la red neuronal es una estructura, puesto que está constituida por diversos elementos básicos interrelacionados.

Cuando el cerebro de un ser humano adulto descompone un acontecimiento externo, por ejemplo, al observar a un muchacho que trata de atrapar a un perro, el «modelo de descomposición» sería aún mucho más complicado que el esquema de la página siguiente, que, por otra parte, no hay que ver como imagen estática, sino como si fuera una película.

Ciertos sectores de esta estructura espaciotemporal pertenecerían probablemente a estímulos parciales, como «muchacho» o «perro», otros a los estímulos causados por la actividad, como «atrapar», y, finalmente, otros pertenecerían al escenario en donde se desarrolla dicha actividad. Ciertas

partes de este «modelo de excitación nerviosa» podrían ser, a su vez, parte de otras subestructuras. Así, «movimiento» podría ser parte de las subestructuras «muchacho», «perro» y «atrapar». El sector correspondiente a «ser vivo», que se compondrá de innumerables componentes, sería estimulado por «joven» y «perro».

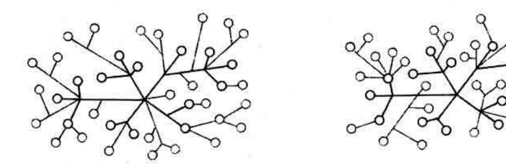


Nuestro cerebro está continuamente descomponiendo percepciones sensoriales para seleccionar y ordenar sus características principales. Pero, ¿cómo llegan a elaborarse los conceptos en esta continua actividad neuronal?

En realidad vemos muchas imágenes parecidas. Un bebé percibe a su madre; ve constantemente su cara, escucha su voz, siente el calor de su piel. Todo esto conduce a la elaboración de modelos de descomposición que se repiten frecuentemente. Si bien es cierto que en cada ocasión las estructuras parciales, o sensaciones, estarán sometidas a diferentes interferencias —una vez se oirá la radio en el trasfondo; la madre llevará una u otra blusa; la temperatura de sus manos será más o menos caliente— y la percepción global (y, por tanto, también los modelos de descomposición) será cada vez distinta, siempre habrá determinados componentes que se repetirán. Y son precisamente estos componentes que *se repiten .conjuntamente* una y otra vez en el modelo de descomposición los que constituyen lo «esencial» en la idea de «madre».

Esta combinación de componentes constituye el núcleo del concepto «madre», tan frecuentemente ligado a estímulos agradables. El cerebro va grabando gradualmente esta combinación de componentes esenciales (representados en rojo en

nuestro esquema). Así, esta estructura llega a ser un engrama, es decir, un circuito de actividades neuronales vinculadas. Siempre que una parte de esta red sea estimulada (la voz de mamá, la cara de mamá, el olor de mamá) se activarán todos los sectores que componen el circuito que corresponde a «madre».



Percepción 1 **Percepción 2**

Pero esto no es más que la identificación de una persona determinada, y no conduce a la formación de un concepto, como «cuchara», «pájaro» o «dar». Sin embargo, es probable que el proceso de elaboración de los conceptos no sea muy diferente. Determinados modelos de excitación formados por determinados componentes tienden a producirse una y otra vez. Al principio sin mucha precisión, por dos motivos: el mecanismo de descomposición no funciona aún con toda perfección en el cerebro de un niño pequeño, y sólo a lo largo de su desarrollo cerebral irá sofisticándose para dar lugar a estructuras cada vez más complejas. Además, al comienzo de la elaboración del concepto aún no está claro cuáles son los componentes que lo forman, y cuáles son sólo factores secundarios que, por casualidad, suelen acompañar a los factores esenciales. La elaboración de un concepto, la definición gradual de su contenido, podría representarse como vemos en la página siguiente.

Con el tiempo, el concepto va adquiriendo cada vez más componentes. De este modo, su contenido se va haciendo cada vez más claro y preciso; se va diferenciando de otros conceptos parecidos. Se convierte entonces en un modelo de excitación que es activado siempre conjuntamente. Sin embargo, su contenido nunca llega a ser definitivo, ni siquiera al cabo de mucho tiempo. Incluso en el cerebro adulto, la estruc-

tura y el contenido de un concepto están sujetos a continuas alteraciones y precisiones. A la estructura formada se le unirán nuevos componentes, y otros serán desechados. En el cerebro de algunos de los lectores de este libro, las actividades neuronales vinculadas al concepto de «evolución» pueden haber experimentado algunas alteraciones.

Estadio preliminar En desarrollo Concepto definido

Entre todos los modelos del cerebro que llegan a cristalizarse como «conceptos», hay uno que tiene una extraordinaria importancia. Se trata de la estructura que corresponde al «yo»; del ser pensante. Algunas partes de esta estructura se activan sin necesidad de estímulos sensoriales externos, mientras que en otros casos la estructura que corresponde al «yo» está implicada en la percepción de acontecimientos externos. Esta diversidad de interrelaciones hace que resulte especialmente difícil definir qué componentes están vinculados. Pero una vez se ha conseguido esto —al principio confusamente, pero cada vez con más precisión—, se despierta en el ser humano la *conciencia* de su propia existencia.

Ahora estamos en condiciones de comprender, o al menos intuir, cómo se llega a elaborar un concepto en el cerebro. Para ello, hemos atribuido toda la dificultad a la complejidad del «mecanismo multifásico de descomposición de la información del cerebro», es decir, a la complejidad de los circuitos neuronales y de los procesos de ramificación y registro.

Para considerar el fenómeno del lenguaje, que era nuestro objetivo, no es necesario describir los procesos moleculares implicados en el tratamiento de la información obtenida. Podemos partir simplemente de que determinados «modelos de excitación» quedan fijados e interrelacionados de un modo definitivo. También podemos partir de que estas estructuras

interrelacionadas son la base de lo que denominamos «ideas» o «conceptos». Por tanto, los cerebros de los animales tienen, en este sentido, la capacidad de elaborar conceptos («mi árbol», «mi pareja», etc.). La fijación de las estructuras de descomposición de la información, que resulta necesaria incluso para los animales primitivos, no tiene que estar necesariamente vinculada al lenguaje.

Pero, ¿cómo podemos comprender que tanto el cerebro del hombre como los cerebros de los animales puedan realizar la descomposición de las percepciones sensoriales de un modo coherente con el mundo exterior? ¿Es esa capacidad de análisis una facultad innata del cerebro? Y, si lo es, ¿no es sorprendente que esa descomposición corresponda a los acontecimientos reales del mundo exterior y los refleje de manera que el cerebro pueda establecer relaciones de causa y efecto, e incluso prever os acontecimientos posteriores?

La realidad es que el cerebro tiene la capacidad de descomponer el mundo exterior según sus características. Conocemos el tiempo y el espacio, podemos comprender de forma lógica el movimiento y las relaciones de causa y *efecto*. A primera vista puede parecer que esta facultad innata es algo fantástico e incomprensible; sin embargo, resulta bastante simple. Se trata, una vez más, del antiguo principio de «adaptación mediante la selección».

Los circuitos neuronales de nuestro cerebro están correctamente conectados, de forma que podemos analizar adecuadamente los acontecimientos que se producen en nuestro medio ^ambiente y orientamos en nuestro mundo de percepciones. Esto se debe a que los animales cuyos cerebros no eran capaces de analizar la realidad correctamente fueron eliminados por la selección natural. Sólo consiguieron sobrevivir aquellos cerebros capaces de descomponer sus percepciones del mundo exterior para poder sacar conclusiones correctas, y esta capacidad se transmitió genéticamente. A través de la evolución nuestros cerebros han ido adaptándose gradualmente a las condiciones de nuestro medio ambiente, y *sólo a través de la selección pudo llegarse a un estadio de*

desarrollo en el que el análisis de las percepciones sensoriales corresponde a las características de la naturaleza.

Pero nuestra intención era hablar del lenguaje; queríamos analizar cómo un concepto, es decir, un modelo de activación de los circuitos neuronales, podía ser asociado en todos los cerebros a un mismo símbolo fónico.

Las palabras son también estructuras: una secuencia de sonidos que, canalizada a través de las terminaciones nerviosas del oído, llega a «representarse» en el cerebro. La descomposición de la estructura acústica comienza ya —al igual que ocurre con las percepciones visuales— en el propio órgano receptor. Las terminaciones nerviosas efectúan una primera descomposición del estímulo en informaciones básicas, por ejemplo: aumenta la intensidad del sonido; baja el tono, etc. Finalmente, la estructura acústica que constituye una palabra pronunciada provoca en el cerebro una activación de los circuitos neuronales: una estructura sonora.

Ahora se trata de que esta estructura sonora, que puede corresponder, por ejemplo, a la palabra «mesa», se relacione con la estructura conceptual que en el cerebro corresponde a «mesa». Naturalmente, esto sólo será posible si el concepto «mesa» está ya registrado, al menos rudimentariamente, en el cerebro. Expresiones como «desgravación fiscal» o «arquetipo» pueden llegar a oídos de un niño, pero no encuentran resonancia en su cerebro; no pueden ser asociadas a las correspondientes estructuras conceptuales. El niño sólo puede comprender las palabras que correspondan a su mundo de conceptos, es decir, que pueda asociar a estructuras conceptuales.

Cómo se desarrolla este proceso es algo que sólo podemos intuir. Probablemente se basa en la frecuente aparición conjunta de una estructura sonora y el objeto al que corresponde. Básicamente, el proceso es el mismo que permitía reconocer como núcleo de una estructura a los componentes básicos que aparecían reiteradamente en las sucesivas descomposiciones, de forma que este núcleo quedaba registrado como una unidad compleja de componentes interrelacionados, como una estructura conceptual. Ahora es la coincidencia de ambas estructuras, sonora y conceptual, lo que hace que entre ellas se establezca una conexión. Para ello es extremadamente importante la memoria a corto plazo, ya que no es frecuente que la palabra se escuche en el momento preciso en que se percibe el objeto que designa. Por lo general, transcurrirá algo de tiempo desde que el niño escucha la exclamación «¿Dónde habré puesto yo la llave?» y el momento en que la llave aparece en el campo de visión del niño.

Al parecer, sólo después de haber establecido algunas conexiones entre las palabras escuchadas y los conceptos correspondientes, se establece cierto orden en el modelo de descomposición, lo que tiende a facilitar posteriores conexiones. Lo que resulta realmente fascinante es observar que en *los cerebros de todos los niños se cristalizan estructuras conceptuales* muy *parecidas. Éste es el verdadero misterio del lenguaje.* La comunicación sólo puede funcionar gracias a que los conceptos son enormemente parecidos en los distintos cerebros. Podemos intentar descifrar un poco este misterio.

Lo esencial aquí es el efecto retroactivo del lenguaje sobre el desarrollo de las estructuras conceptuales. Se trata de un proceso de armonización, de una progresiva adaptación, que posibilita el lenguaje. En sí, el lenguaje es *fijador de conceptos.* ¿Qué quiere decir esto? ¿Cómo funciona?

A los niños pequeños que están aprendiendo a hablar se les corrige: «eso no es un guau-guau, es una mosca», o «te he pedido la cuchara, no el cazo». Los niños son sorprendentemente comedidos; sólo emplean las palabras con cuya estructura conceptual están familiarizados. Así pues, no se trata de hacerles asociar significados y significantes, sino de introdu-

cir —de forma simple y sin pretensiones didácticas— nuevas palabras en su vocabulario. Las palabras se pronuncian en situaciones concretas. Imaginemos a un niño que es ya capaz de asociar la mayoría de las palabras de una frase con sus correspondientes estructuras conceptuales, cuando se encuentra una palabra nueva para él. Al escucharla, el niño probablemente «buscará» inconscientemente la estructura conceptual correspondiente entre los innumerables modelos de descomposición que se han podido activar en ese momento. Esta «búsqueda» inconsciente es un mecanismo esencial en el cerebro humano. Seguramente el niño no podrá identificar el concepto correspondiente la primera vez que escuche una palabra, puesto que en la mayoría de los casos habrá numerosas interferencias causadas por otros detalles de la situación en que la palabra ha sido pronunciada. Sólo mediante repeticiones podrá llegar a establecer cuál es realmente el núcleo conceptual correspondiente a la nueva palabra.

De esta forma, el niño va siendo introducido a través del lenguaje a los conceptos existentes en el cerebro de los adultos. Toda palabra, toda estructura sonora, tiene que tener una correspondencia conceptual que puede ser encontrada. La estructura conceptual puede ser buscada, de manera que ¡las palabras del lenguaje inducen al niño a determinar el contenido común a diferentes situaciones que corresponde a los conceptos que los adultos utilizan en el lenguaje! Mediante las estructuras sonoras, es decir, a través del lenguaje, se llega a identificar y registrar la estructura conceptual correspondiente.

Por tanto, si dejamos a un lado los primeros comienzos, podemos ver que los conceptos no son elaborados en el cerebro del niño por la información genética, es decir, «desde dentro», sino que más bien son inducidos a través del lenguaje, a través de las palabras que el niño oye en las conversaciones de sus padres y hermanos. El cerebro del niño cuenta con el mismo mecanismo de descomposición que los cerebros de los adultos, y mediante ese mecanismo busca las estructuras conceptuales que puede relacionar con las estructuras sonoras

que escucha. Así es como *las estructuras sonoras ayudan a fijar en el cerebro las estructuras conceptuales.*

Los conceptos de los adultos van adaptándose unos a otros gracias a su empleo en determinados contextos, y gracias a esta adaptación los seres humanos son capaces de entenderse. A esto se debe también el parecido entre los conceptos de un cerebro y otro. Es el lenguaje lo que hace posible esto; es el lenguaje lo que abre el camino hacia una comunicación verdaderamente intensa.

Pero hasta ahora nos hemos limitado a describir la fase «intuitiva» del aprendizaje de un lenguaje. A ésta le sigue una fase consciente, en la que los niños preguntan e indagan el significado de palabras de uso menos común, obligándonos incluso a consultar el diccionario. Resulta muy difícil atribuir las estructuras conceptuales correspondientes a las palabras que, por tener un uso poco común, requieren procesos de descomposición enormemente complejos. Es mucho más fácil explicarlas con otras *palabras,* es decir, partir de conceptos ya conocidos para crear un nuevo modelo de activación de los circuitos neuronales. Naturalmente, con este sistema se intensifica la transmisión de las estructuras conceptuales existentes en el cerebro de los adultos.

Los padres deberían pararse a considerar estos fenómenos con la mayor seriedad. Toda la capacidad de expresión lingüística de la persona —lo que representa una parte bastante importante de la inteligencia— depende de la claridad con que se hayan formado sus conceptos.

Además, la formación de conceptos repercute sobre el carácter del niño. Veamos un ejemplo: un niño de seis años pregunta a su padre: «¿Qué es la virilidad?»

Respuesta 1: «Un hombre no llora cuando se cae; aprieta los dientes y se aguanta. Eso es la virilidad.»

Respuesta 2: «La virilidad consiste en ayudar a los más débiles, aunque uno tenga que ponerse en peligro para hacerlo.»

Para cualquier joven la virilidad es algo positivo, algo deseable. A lo largo de su vida se encontrará una y otra vez con que esta palabra es utilizada en diferentes contextos que implican | una valoración moral. Pero lo que asocie el joven con esa palabra estará determinado esencialmente por aquella primera explicación de su padre.

Puesto que los conceptos abstractos se configuran en nuestro cerebro a partir del lenguaje, es decir, a partir de conceptos más simples y conocidos, la forma de pensar de la persona puede estar influenciada también por su lenguaje. En cambio, no se ha podido determinar si los modelos de descomposición que los adultos transmiten al cerebro del niño pueden tener un efecto retroactivo sobre el desarrollo de su propio mecanismo de descomposición. Resultaría muy difícil —aunque no del todo imposible— analizar el modo en que un cerebro descompone las percepciones sensoriales, y si está determinado por la herencia genética, o si existe una influencia del lenguaje del que se sirve. Así, por ejemplo, en el lenguaje de los indios sioux se hace una diferenciación estricta entre los seres vivos en movimiento y los seres vivos en reposo. Se emplean diferentes palabras para denominar un animal en reposo y el mismo animal en movimiento. ¿Significa esto que existen pautas de descomposición diferentes determinadas genéticamente, o se trata de una diferenciación surgida al azar en un momento determinado y transmitida después a través del lenguaje?

El establecimiento de una correlación entre las estructuras, conceptuales y sonoras —tanto en el aprendizaje del niño como en el proceso de desarrollo del lenguaje a lo largo de la evolución del ser humano— puede compararse en ciertos aspectos al proceso de autoorganización de las primeras estructuras que fueron capaces de autoduplicarse en el caldo primario. También en el caso del lenguaje parece como si un barón de Münchhausen hubiera conseguido salir de la niebla de la inexactitud tirando de su propia coleta. Cuanto más se desarrolla la capacidad lingüística, más se diferencian y sofistican los conceptos en el cerebro.

El idioma de los bosquimanos del Kalahari se compone de menos de mil palabras. Sin embargo, su vocabulario es suficiente para permitir una comunicación precisa, debido a que ideas que en nuestro idioma se dividen en varios conceptos, en su idioma se encuentran unidas en un solo concepto. Por ejemplo:

/gám* significa al mismo tiempo «Sol, calor, sed»,
ne/ni significa al mismo tiempo «Ojo, ver, éste»
y mi significa al mismo tiempo «Hablar, yo»

* La barra representa un sonido chasqueante no utilizado en nuestro idioma.

Sería un error afirmar que el idioma de los bosquimanos emplea una misma palabra para varios conceptos. En el pensamiento del bosquimano, constituye un solo concepto lo que en nuestros cerebros está diferenciado en varios.

El lenguaje —tanto en el desarrollo del niño como en el proceso evolutivo de la humanidad— es un requisito imprescindible para alcanzar una capacidad intelectual elevada. Las estructuras conceptuales y las estructuras sonoras se complementan en el sistema de información intelectual del mismo modo que las proteínas y los ácidos nucleicos se complementan en el sistema de información genética. Unos no pueden desarrollarse sin la ayuda de los otros.

La inexactitud, inexorablemente ligada al proceso de autoduplicación —aunque fuera reduciéndose progresivamente a lo largo de la evolución—, aparece en la comunicación, como un ave fénix surgiendo de sus cenizas, con una forma nueva y un nuevo vigor. Las estructuras conceptuales del cerebro contienen solamente los componentes esenciales. Siempre que los objetos, acontecimientos o sentimientos contengan estos componentes esenciales, serán incluidos en el mismo concepto. En cada experiencia los modelos de descomposición son mucho más detallados, pero a la hora de establecer conceptos, estos detalles no son tomados en cuenta. Por ejemplo, la palabra «zapato» no nos indica nada sobre el material, color o estilo del objeto. La delimitación de los objetos que se incluyen en un concepto es *básicamente inexacta*. Y esto forma parte de la esencia de toda abstracción.

Los conceptos tienen que ser suficientemente amplios, suficientemente extensos, para poder incluir muchos objetos o L acontecimientos del medio externo. Este fenómeno es esencial en la elaboración de conceptos. Sólo así —sin considerar los detalles— resulta posible la comunicación.

Si cada una de las cucharas que ponemos en la mesa tuviera su propio nombre, si cada tipo de juego a que jugamos no pudiera denominarse genéricamente con el concepto «juego», los humanos no podríamos entendernos, puesto que necesitaríamos un número infinito de palabras que nadie llegaría a aprender.

Debido a la necesidad de abarcar en un *mismo* concepto —representado por una secuencia de sonidos— muchas cosas, acciones o sensaciones semejantes, el contenido de un concepto, es decir, la totalidad de objetos, acontecimientos o sensaciones que pueden ser expresadas con él, tendrá necesariamente que ser impreciso. La información referente a los detalles se pierde si no es necesaria para la comprensión del contexto; sin embargo, si es esencial se producen nuevas subdivisiones. Así, por ejemplo, el lenguaje de los esquimales distingue cuatro tipos de nieve, y los árabes tienen varias denominaciones para lo que nosotros llamamos simplemente «arena».

Pero los límites no son rígidos. ¿Cuándo un «muchacho» es todavía un «niño», y cuándo pasa a ser un «joven», o incluso un «hombre»? ¿Cuándo hablamos de una «choza», de una «cabaña» o de una «casa»? Fijar los límites es difícil, sobre todo si no disponemos de ejemplos concretos que hagan comprensible el concepto. Por ejemplo, cuando se trata de un concepto abstracto como «justicia» o «democracia». Los límites tienden a difuminarse por completo cuando el grado de abstracción es aún mayor o cuando se trata de sensaciones; así ocurre, por ejemplo, en conceptos como «espíritu», «nostalgia» o «religión».

El propio concepto de «lenguaje» no presentaba antiguamente ningún problema. Sin embargo, ahora sabemos que también los animales se transmiten señales mediante posturas y gestos. ¿Se trata de un «lenguaje»? La capacidad de ciertos

insectos de transmitir a sus congéneres información mediante sustancias aromáticas, ¿es un lenguaje? ¿Y cuándo las abejas se comunican la dirección y la distancia a que se halla una fuente de alimento —es decir, cuando transmiten datos cuantitativos— mediante el movimiento de su abdomen y el ritmo de su danza, tomando como referencia la posición del sol? ¿«Habla» un chimpancé que es capaz de comunicarse con su cuidador mediante 70 símbolos diferentes dispuestos en una gran máquina de escribir? Responder a estas preguntas sólo significa ampliar el modelo de descomposición del concepto «lenguaje», es decir, precisar más dicho concepto.

En la vida cotidiana la gente suele emplear, con un resultado bastante bueno, conceptos muy imprecisos. Los que corresponden al campo de las sensaciones son especialmente difíciles de aprehender, y adquieren matices diferentes en cada cerebro. Escuchamos palabras como «amor», «simpatía», «afecto», «nostalgia»... y, como mucho, llegamos a imaginar los sentimientos que el hablante trata de expresar con estas palabras. Es sorprendente que nos entendamos tan bien a pesar de esta inexactitud, aunque a veces se produzcan «diálogos de sordos», o surja una disputa por un «malentendido» que se aclara después de haber explicado ambos interlocutores lo que «quieren decir» o «entienden» con una misma palabra.

En las traducciones se hace evidente que la amplitud de contenido de los conceptos no es equivalente en diferentes idiomas. Conceptos parecidos pueden tener diversos componentes en cada idioma. Por eso, los diccionarios nos ofrecen varias posibilidades de traducción para un mismo concepto, entre las cuales ha de escogerse la adecuada para el contexto en que ha de utilizarse.

Así, si le preguntamos a un alemán qué le sugiere la palabra *Einsamkeit* (soledad), nos dirá generalmente que para ellos esta palabra está asociada a grandeza, superioridad y claridad; el mismo concepto en inglés *(lonesomeness)* le sugiere a un americano, más bien la idea de miedo, de tristeza y abandono por parte de los demás.

La diferencia de matices que los distintos pueblos dan a los mismos conceptos —y esto también ocurre con los diferentes grupos sociales— viene a demostrar que el lenguaje de los adultos contribuye decisivamente a la creación y fijación de conceptos en el cerebro de los niños, y que los conceptos no están predeterminados por la información genética.

En la diplomacia internacional, la falta de una total equivalencia entre los conceptos de los diferentes idiomas puede resultar problemática; inicialmente incluso puede hacer más fácil establecer un acuerdo o contrato, pero después puede dar lugar a interpretaciones diferentes y provocar nuevas dificultades. Llegar a entenderse en un idioma extraño no resulta muy difícil, pero sí lo es llegar a dominar todos sus matices.

Antes de pasar a considerar los aspectos gramaticales del lenguaje, tenemos que considerar brevemente los aspectos fonéticos de las palabras. Cada palabra está constituida por una *secuencia de sonidos* (o fonemas), que se representan en la mayoría de las escrituras existentes mediante una secuencia de letras. La palabra es, por tanto, una pequeña estructura.

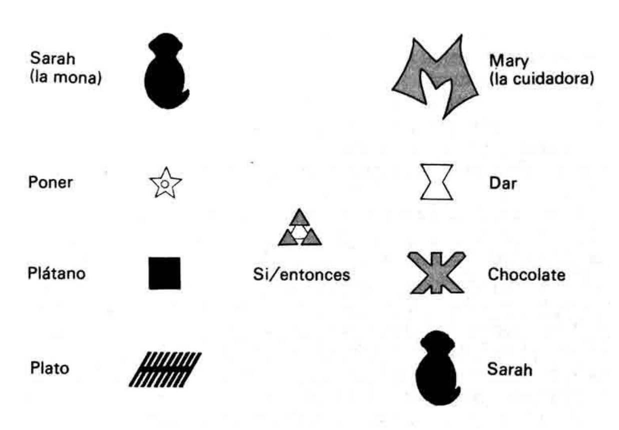
Aparentemente, lo más lógico sería representar cada concepto mediante un solo sonido, puesto que los conceptos son las partes más elementales de nuestro pensamiento. La dificultad reside en la limitación de nuestros órganos de fonación (y de audición), que no son capaces de producir (ni de captar) miles de sonidos diferentes y distinguibles. Sin embargo, para poder comunicarnos necesitamos una enorme cantidad de conceptos. El número de sonidos diferentes que podemos emitir (entre 50 y 80) no es suficiente en absoluto para simbolizar los conceptos necesarios para la comunicación. Por eso todos los idiomas del mundo utilizan *secuencias de* sonidos para expresar los conceptos. Igual que ocurría con las cadenas de polímeros, las posibilidades de combinación son ilimitadas. Todas las palabras son, pues, estructuras compuestas por sonidos, a la vez que elementos básicos para la formación de frases, es decir, para la configuración de estructuras cuyos componentes son los conceptos.

Cualquier acontecimiento o pensamiento es transmitido mediante un doble proceso cerebral: primero se produce una *descomposición* del acontecimiento o idea en conceptos individuales y sus interrelaciones; después, los conceptos son traducidos a palabras y enlazados en la frase, configurándose así una *estructura*. La ciencia del lenguaje distingue, por tanto, entre la se*mántica*, que trata del significado de los conceptos, y la *gramática*, que regula mediante normas la relación y colocación de los componentes .básicos en la frase.

Al igual que los hombres, los chimpancés pueden relacionar toda una serie de conceptos con determinados símbolos y aprender los rudimentos de una gramática para establecer conexiones lógicas. Tras un largo período de aprendizaje (algo que también necesitan los niños) es posible que un chimpancé se: comunique mediante una serie de símbolos colocados en una pizarra. La comunicación se establece en las dos direcciones; el animal no sólo es capaz de entender el sentido de la secuencia de símbolos que se le presenta, sino que también puede comunicar sus deseos colocando en la pizarra la secuencia apropiada de símbolos para expresarlos.

Consideremos un ejemplo ya clásico (ver gráfico siguiente).

Sarah aprovechará inmediatamente esta oportunidad, y pondrá el plátano en el plato; y se enfadará si Mary trata de darle una manzana en lugar del chocolate. Aquí se han utilizado símbolos —incluso para representar ideas abstractas— cuyo significado ha sido capaz de comprender el animal. Se trata de símbolos abstractos. El plátano está representado por un cuadrado rojo, no por la imagen del plátano. Podemos decir que el cerebro del chimpancé es capaz de relacionar determinados símbolos con determinados conceptos. Más aún, el orden de la secuencia de los símbolos refleja unas relaciones gramaticales simples que son entendidas por el animal.



(Según A. J. y D. Premack)

El significado de las frases reside en dos factores. Por una parte, en las estructuras conceptuales de las palabras empleadas y, por otra, en las interrelaciones y dependencias existentes entre las palabras. Sólo mediante esta relación entre las palabras, es decir, mediante la consideración de determinadas reglas gramaticales, puede convertirse la secuencia de palabras en una frase, en una *estructura* de conceptos. En los idiomas de los hombres se utilizan cuatro medios para expresar estas relaciones:

1. El orden de las palabras.
2. Introducción de modificaciones en la palabra original.
3. Empleo de afijos y de palabras complementarias.
4. Cambios en la entonación (no en nuestro idioma, pero sí, por ejemplo, en el chino).

No es lo mismo decir «Marco Antonio ama a Cleopatra» que «Cleopatra ama a Marco Antonio». El orden de las palabras existe en todas las lenguas, puesto que el lenguaje es un proceso temporal; en todas las lenguas el orden o secuencia dé las palabras se utiliza como medio para expresar relaciones. Se escribe siguiendo una secuencia según una serie deformas; así, por ejemplo, se suele comenzar por el sujeto.

Pero la secuencia no es suficiente para expresar relaciones complejas en la frase. En nuestro idioma, y en otros idiomas

afines, se recurre entonces a modificar ligeramente la palabra original. Por ejemplo, si asociamos la palabra «dos» con «estrella», tendremos que decir «dos estrellas». «Ver» y «ayer» se unirán en «*vi* ayer» o «*vimos* ayer», etc., según sea el sujeto de la acción. Las numerosas reglas de conjugación y declinación de la gramática ponen en apuros a los adultos que tratan de aprender una lengua extranjera: en cambio, de niños, superaron estas mismas dificultades con relativa facilidad al aprender su propia lengua.

Finalmente, las relaciones pueden ser expresadas mediante la utilización de afijos o palabras complementarias: «él *no* ha *re*cogido».

Aunque cada idioma utiliza estos medios con mayor o menor intensidad, la mayoría de las lenguas se sirven de una combinación de los tres para expresar las relaciones entre los elementos básicos de una frase. Cuanto más complejos sean los medios y las posibilidades que ofrezcan, más difícil será conseguir hablar correctamente una lengua, y más rica en matices será su expresividad.

Así pues, el cerebro del niño no sólo ha de establecer conexiones entre estructuras sonoras y estructuras conceptuales, sino que tiene además que asimilar las reglas gramaticales que gobiernan la expresión de relaciones en su idioma. Esta última tarea parece ser la que presenta mayores dificultades; los niños aprenden a comprender las frases mucho antes que a construirlas y cometen constantes errores que los adultos tienen que ir corrigiendo poco a poco. De forma inconsciente los niños van aprendiendo las reglas gramaticales que utilizan los adultos deduciéndolas de la comparación de las estructuras de descomposición situaciones con las estructuras oracionales (frases). La capacidad de aprender las reglas gramaticales es uno de los mayores logros del cerebro humano.

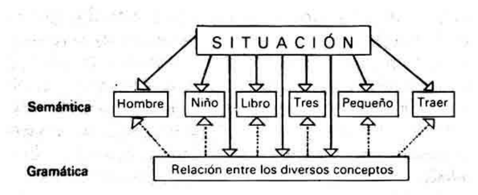
En cualquier parte del mundo, los niños aprenden sin dificultad su lengua materna. Sin embargo, los niños no nacen con unos conocimientos de «gramática universal» ya programados. Esto implicaría que la gramática estuviera codificada en la información genética y que dispusiera de conexiones neuronales ya establecidas. Si fuera así, los conocimientos

gramaticales se contarían entre los instintos. La idea es absurda y está en contradicción con la tendencia general, que muestran los animales superiores, hacia una superación del nivel instintivo.

Lo cierto es que la selección favoreció el surgimiento de un mecanismo cerebral de descomposición de la información capaz de reflejar correctamente las relaciones de causa y efecto, es decir, capaz de descomponer las situaciones en conceptos y de establecer interrelaciones entre las estructuras conceptuales de acuerdo con la realidad Hasta aquí llega la influencia de la genética.

Pero el lenguaje va a expresar estos conceptos mediante estructuras sonoras (semántica), y sus relaciones mediante la estructura oracional (gramática). La necesidad de alcanzar una misma meta es lo que determina la semejanza de los medios que utiliza la gramática (estructuras profundas). Necesidades iguales requieren soluciones parecidas. De ahí que las características universales del lenguaje se basen en la lógica del análisis situacional y de las relaciones conceptuales. La conexión con la información genética solo existe indirectamente a través del mecanismo de descomposición existente en el cerebro, mecanismo que, a su vez, fue adaptado a las exigencias de la naturaleza, a la altura de las cuales tendrá que estar también toda gramática.

Imaginemos que en algún lugar del mundo ayer por la tarde una persona estada sentada confortablemente en un sillón. Observó y descompuso una



Hoy desea comunicar su observación. En su cerebro ha quedado registrado lo esencial de la situación. Ha olvidado cómo era el reloj de pared, y el color del mantel, pero muchas otras partes de su observación han permanecido grabadas en

su memoria como una gigantesca estructura de descomposición de la información. En esta estructura no sólo están los conceptos más importantes del acontecimiento observado, sino también la relación que los vincula.

Para comunicar su observación tiene que expresar los conceptos mediante palabras y la relación mediante la utilización de las normas gramaticales que requiera la frase que vaya a construir.

Al hacerlo se añade una relación temporal entre el momento en que tuvo lugar el acontecimiento y el momento en que se hace el relato; para ello, esta persona pone el verbo en pasado y añade el adverbio de tiempo «ayer». Según las relaciones entre conceptos que nuestro personaje haya registrado en su estructura de descomposición, y dando por supuestos ciertos conocimientos previos en sus oyentes, dirá:



El lenguaje implica dos procesos mentales:

El primero consiste en descomponer la situación o idea en conceptos individuales y en las interrelaciones correspondientes. El segundo consiste en representar el resultado de esta descomposición mediante una oración gramaticalmente correcta. El proceso se invertirá en el receptor: las estructuras sonoras del lenguaje activarán estructuras conceptuales capaces de representar lo esencial de la situación.

La evolución dio un paso muy importante cuando, a través del lenguaje, se hizo posible transmitir de un cerebro a otro las estructuras de excitación neuronal correspondientes a una idea, una experiencia o un deseo. Las estructuras habían encontrado un nuevo medio de continuar su expansión.

Como había sucedido con la capacidad de autorreproducción, la información intelectual fue aumentando su influencia

gracias a un mecanismo automático interno del sistema. La continua transmisión de conocimientos llevó al hombre —ya en un estadio avanzado de evolución— a desarrollar una serie progresiva de inventos. Esta serie comenzó hace unos 6.000 años con la invención de la escritura, que sería perfeccionaba con la introducción de la imprenta (que tuvo lugar hace unos 1.000 años en China, Corea y Japón, e, independientemente, hace unos 500 años en Europa). En las últimas décadas se han desarrollado las técnicas de *telecomunicación*, cuya importancia es extraordinaria.

Esta serie de inventos ha sido de gran trascendencia para el desarrollo de la humanidad por tres motivos:

Primero, nos ayuda a ampliar a voluntad la relativamente limitada memoria de que disponen nuestros cerebros. Los conocimientos, sin limitación cuantitativa, están a disposición de todo el mundo en las bibliotecas y bancos de datos. Sería prácticamente imposible conservar tal cantidad de información en nuestros cerebros.

Segundo, la difusión de la información intelectual, y con ella su influencia y posibilidades, ha aumentado enormemente y ha superado limitaciones de tiempo y espacio.

Y tercero, el grado de exactitud en la transmisión de las estructuras se ha multiplicado. El método original de transmisión de la información —la transmisión verbal— está, por naturaleza, sujeto a errores; aparte de que siempre existía el riesgo de que se rompiera la cadena de transmisión.

Aquí ha vuelto a repetirse un fenómeno que tuvo lugar anteriormente en la fase biológica: al igual que la autoduplicación de las estructuras fue perfeccionándose progresivamente, la comunicación tiende por sí misma hacia el desarrollo de un mayor potencial. Ambos sistemas eran inicialmente lentos e inexactos, pero a lo largo de su evolución van adquiriendo más velocidad y precisión en la propagación de sus estructuras.

20. EL HILO ROJO EVOLUTIVO EN MANOS DEL HOMBRE

«El eslabón, durante tanto tiempo buscado, entre el animal y el verdadero ser humano, somos nosotros.»

KONRAD LORENZ

El primitivo cazador y recolector, a pesar del lenguaje y de sus instrumentos, no era mucho más que un ser biológico en el reino de la biología. Estaba sujeto al hambre, a la enfermedad y a los ciclos de reproducción y muerte; a las leyes de una selección que —una vez había desaparecido el peligro de aniquilación por parte de otros predadores— alentaba él mismo mediante las guerras que eventualmente mantenía con las tribus de «salvajes que vivían más allá de las montañas».

Pero un buen día, hace l0.000 o 15.000 años, superó los límites de aquel mundo puramente biológico. Probablemente serían las mujeres quienes se darían cuenta de que de los granos caídos cerca de sus cabañas en el otoño anterior habían surgido nuevos brotes y plantas que volvían a dar fruto. Nunca sabremos quién sería, ni tampoco dónde, pero un día un ser humano plantó la primera simiente de trigo en la tierra.

A finales del período glacial, otras tribus que se habían dedicado predominantemente a la caza empezaron a seguir a las manadas de animales que empezaban a transmigrar. Juntos recorrieron cientos de kilómetros adaptándose al ritmo de las estaciones. El hombre cuidaba con todo celo de que ningún otro predador pudiera causar daño a *sus* rebaños de presas. El perro —compañero del hombre desde hace unos 15.000 años— le ayudó en su tarea. Se había producido una simbiosis entre hombre y animal, dominada cada vez más por la voluntad del primero. El recolector se había convertido en agricultor; el cazador, en pastor.

Pronto se daría otro paso decisivo, aunque al principio el hombre todavía no comprendiera su importancia. El hombre comenzó a elegir. Sí, eligió y *seleccionó.*

Seleccionó el tipo de simiente que le pareció mejor para la siguiente siembra; seleccionó el macho cabrío que había de engendrar a los próximos cabritillos. Los campesinos y pastores, al seleccionar, se convirtieron en agricultores y ganaderos. Ya no era la competencia biológica la que determinaba quién iba a tener descendencia, quién iba a sobrevivir. La selección no corría a cargo de la naturaleza, *sino del hombre.*

El hombre estaba a punto de supeditar las leyes biológicas a sus propios intereses. A partir de entonces sus deseos podían determinar la evolución biológica. En tumbas de hace 9:000 años se han encontrado granos de trigo de variedades obtenidas por la selección realizada por el hombre.

Desde entonces ha pasado mucha agua por el Éufrates y el Nilo. Se ha inventado el arado y también los bancos de semen (ahora el esperma de un toro puede servir para fecundar a diez mil vacas). Convivimos con gatos siameses y cactus; los aviones fumigan las plantaciones de algodón con productos químicos. Las gallinas se sientan en ponederos climatizados y las naranjas no tienen pepitas. La falta de pepitas significa que no pueden reproducirse, pero el hombre se encarga de mantener estas especies reproduciéndolas de un modo vegetativo. Las naranjas sin pepitas son más fáciles de comer; y es el hombre quien decide qué organismos pueden sobrevivir.

También los pequineses, cuyo pene tiende a arrastrarse por el suelo y a infectarse con facilidad, pueden seguir viviendo. Nosotros los llevamos al veterinario, los mimamos y los peinamos para que puedan ganar un premio en una exhibición. La competencia no ha desaparecido completamente, pero, ¿se trata aún de una evolución biológica, de una evolución sujeta a una naturaleza capaz de autoorganizarse y autocontrolarse?

El hombre ha dejado de adaptarse al medio ambiente y ha empezado a adaptar el medio ambiente a sus propios deseos. Cada vez hay menos zonas naturales vírgenes. Día a día las carreteras van devorando la naturaleza para abrirse camino

por las selvas brasileñas; día a día van construyéndose aeropuertos en Siberia. El hombre altera rápidamente la superficie de su planeta. Los campos de trigo, las autopistas y los vertederos de basura se multiplican y proliferan. El nuevo medio ambiente que va creando el hombre para sus propios fines es una amenaza para el equilibrio de la naturaleza. Y ya no podemos detener este desarrollo, no podemos recuperar aquel mundo biológico. Intentarlo sería ir contra la dirección de las aspas del molino. Y la rueda de la evolución es imparable.

Nuestra tarea ha de limitarse a tratar de crear una relación armoniosa entre este nuevo medio ambiente creado por el hombre y una naturaleza que también está en sus manos. Sólo podemos intentar impedir que el antiguo mundo de plantas y animales sea aniquilado por completo. Una especie que se extingue se pierde para siempre. La enorme diversidad de información genética es el tesoro de todo un largo proceso de evolución. Y nos ha sido confiado a nosotros. Debemos dejar suficiente espacio vital a los seres vivos, y no sólo a las especies superiores y a los homínidos. También las plantas, los insectos, los corales, peces, arañas y demás especies deberían estar protegidos en espacios naturales o en reservas creadas para su conservación. Nosotros sólo somos un eslabón de la cadena evolutiva; pero cada eslabón de esta cadena es portador y responsable de la riqueza del futuro.

Hay tantos tigres en libertad (unos 3.000) como cautivos en circos y zoológicos. Pero las cifras cambian rápidamente. Dentro de cien años algunas especies que hoy parecen no correr peligro sólo podrán encontrarse —si es que aún se encuentran— bajo la tutela del hombre.

Las especies naturales de plantas y animales están siendo sustituidas progresivamente por las nuevas especies surgidas de nuestros viveros y criaderos. La existencia que llevan las estructuras biológicas en gigantescas poblaciones y monocultivos difícilmente puede ser calificada de biológica. Todas ellas viven y se desarrollan dependiendo de la voluntad humana. Ya se prevé que pronto los lentos y costosos procesos de la selección natural van a ser sustituidos por la manipulación artificial de la información genética. Desde que el hom-

bre ha conseguido comprender las bases moleculares de la reproducción de estructuras, y con ello el principio de la vida, se ha dedicado a aplicar sus conocimientos a las tecnologías biológicas. En vez de dedicarse a la cría, pronto obtendrá en el laboratorio los genes deseados y los «trasplantará» a animales y plantas. Y si tenemos en cuenta que la evolución ha sido un proceso que se ha desarrollado en mil millones de años, da igual que lo consiga dentro de cinco o de quinientos años. ¿Podemos decir que esta manipulación del patrimonio genético de bacterias, toros o incluso del propio ser humano (como instrumento de la medicina) es todavía parte de la evolución biológica?

En la fase *material* de la evolución se crearon muchas moléculas de forma espontánea. Pero podemos encontrar otras moléculas, muchas de ellas nuevas, en las plantas y animales. ¿Pertenecen a la evolución material? Ciertamente no. Estas moléculas son producto de la vida; son producto de la evolución *biológica.*

Ahora se producen otra vez nuevas moléculas en nuestro planeta. Son creadas en los laboratorios químicos. ¿Evolución material? ¿Biológica? No, estas moléculas son el resultado del ansia humana de conocer. Son productos materiales de una evolución intelectual.

Pero al igual que la síntesis artificial de moléculas en los laboratorios ya no es parte de la evolución material, los resultados de los cruces intencionados de animales y plantas, y más aún la creación de organismos genéticamente nuevos, han de ser atribuidos a la fase intelectual de la evolución. Ahora los que sobreviven no son los más capaces de adaptarse al medio natural, sino los que sean capaces de adaptarse al hombre. La evolución se rige por nuevas leyes.

En el capítulo 11 pudimos ver cómo la reproducción de las nuevas estructuras biológicas acabó por agotar las reservas moleculares del caldo primario. La evolución biológica se desarrolló demasiado rápidamente para que la evolución material pudiera seguir su ritmo. Las estructuras biológicas desarrollaron un grado tal de influencia que dejaron sin posibili-

dades a la evolución material. No podían seguir formándose grandes estructuras moleculares. Las estructuras biológicas habían agotado los componentes básicos necesarios para su desarrollo. Allí donde la evolución biológica toma las riendas, la fase material de la evolución tiene que concluir.

Este fenómeno puede apreciarse claramente en la transición hacia la fase intelectual de la evolución. La evolución biológica está perdiendo terreno y posibilidades; pronto no quedará ninguna zona virgen en donde puedan desarrollarse nuevas especies. Las especies animales y vegetales protegidas por el hombre acabarán desplazando a todas las demás. Pronto quedarán —si es que quedan— sólo algunas «reservas naturales» vigiladas y protegidas por el hombre: *museos* de la evolución biológica.

Con toda seguridad, el mundo seguirá poblado por seres vivos de diversas especies. El hombre es una estructura biológica; pero también es algo más. Su cerebro es la base biológica de la evolución *intelectual*. Los procesos biológicos no van a concluir, pero “estarán cada vez más sujetos al control ejercido por la información intelectual. Cuando hace aproximadamente cuatro mil millones de años la evolución biológica relevó a la evolución material, las estructuras que habían surgido en esta fase no desaparecieron del mapa. Al contrario, las estructuras materiales fueron integradas; fueron la base material para la posterior evolución. Se convirtieron en *elementos básicos* para las estructuras biológicas. Su síntesis quedó supeditada al control de la información genética. Del mismo modo, en la esfera de influencia de la información intelectual, todas las estructuras materiales y biológicas quedarán supeditadas al control del intelecto humano Cuando ocurra esto, la evolución biológica habrá concluido. Las leyes de la fase biológica —mutación y “selección, formación de especies y competencia— irán perdiendo progresivamente su vigencia. Empezarán a ser sustituidas por las leyes evolutivas de una nueva fase. La evolución intelectual ha asumido ya su función directriz en el proceso evolutivo. La información intelectual decide el destino, el papel y las posibles alteraciones de todas las estructuras biológicas.

Aunque hasta el momento el hombre sólo haya construido unas cuantas plantas industriales en el mar, aunque los insectos sigan todavía durante un tiempo escapándose al control del hombre, la esfera de influencia de las leyes biológicas va reduciéndose cada vez más. Ahora la evolución biológica, es decir, la lenta adaptación mediante alteraciones fortuitas de la información genética, se está quedando atrás, incapaz de seguir el ritmo de las alteraciones cada vez más rápidas del medio ambiente. En comparación con la influencia del hombre, la evolución biológica se va haciendo cada vez más insignificante. Aunque éste sea un pensamiento amargo para algunos biólogos, *la evolución biológica llega a su fin.*

Allí donde se desarrollan las estructuras de la nueva fase intelectual de la evolución, las estructuras biológicas son arrasadas o integradas. Se convierten en elementos básicos, en base sustancial para la expansión del nuevo sistema de información.

De todo esto puede deducirse que sobre nuestro planeta no existe ninguna especie animal que pueda desarrollar esta fase *junto* al hombre. La especie de los *Homines sapientes* será la única portadora del sistema de información. Si se diera el caso, por ejemplo, se descubrieran ratas que hubieran comenzado a utilizar utensilios o a mejorar su comunicación mediante el empleo de sonidos estructurados, muy pronto las encontraríamos en algún instituto para la investigación etológica. Su desarrollo sería controlado y dirigido por científicos humanos.

Pero volvamos de nuevo a la comparación entre las dos fases de transición. Después de desarrollarse las primeras estructuras con capacidad de autorreproducción, la evolución biológica, en una celebración desenfrenada de esta conquista, consumió todas las reservas moleculares del caldo primario. La evolución material tuvo que terminar; era demasiado lenta y ya no podía servir de ayuda. La vida tenía que avanzar por sus propios medios. ¿Y hoy? También la evolución intelectual tiene que dar sus primeros pasos apoyándose en las fuentes de energía fósil: el carbón, el petróleo, las reservas que fueron

acumulándose durante la fase biológica de la evolución previa. También nosotros estamos en plena borrachera por la celebración de nuestra conquista, y exigimos más placer a la vida. Placer que los hombres —antaño tan insignificantes— tratamos de obtener con una mayor producción industrial, con un mayor desarrollo económico. Y así, cada vez más seres humanos desean más y más.

Desde este punto de vista, es secundario que las reservas de petróleo del planeta duren todavía 40 u 80 años, o que las minas de cobre puedan agotarse dentro de 30 o 300 años. Las curvas exponenciales del consumo demuestran que, por segunda vez en la historia de la evolución, se están consumiendo todas las reservas legadas por una larga fase evolutiva anterior en una especie de euforia de expansión. También la evolución intelectual tendrá que encontrar nuevos caminos para asegurar su desarrollo. Y ya no falta tanto para que llegue el día en que se agoten nuestras fuentes de suministro.

No hay vuelta atrás. Las reservas de nuestro planeta son limitadas. La técnica tiene que seguir avanzando para encontrar nuevas fuentes: reactores de fusión nuclear y aprovechamiento de las radiaciones solares. La humanidad va a necesitarlas muy pronto para poder mantener en funcionamiento los ciclos que ha puesto en marcha, para poder volver a extraer y reciclar materias primas de los productos de desecho, para poder seguir produciendo fertilizantes y mantener en marcha los tractores, sin los que la mayoría de nosotros moriríamos de hambre. Y sin embargo, *más* tecnología —la huida hacia delante— sólo es una ayuda transitoria, no una solución real del problema. ¿Por qué?

Aquel primer hombrecillo se ha convertido en un gigante. Sus ojos, sus oídos, abarcan ahora todo el planeta, su paso le permite incluso escapar a la fuerza de la gravedad. La piedra que sostenía en su mano se ha convertido en energía atómica. Con ella puede mover montañas, pero también... acabar en pocos minutos con toda la cultura acumulada durante milenios.

Y a eso llegará, más pronto o más tarde, si su intelecto sigue atrapado en las ideas, de aquel enano que fue una vez, si

sigue rigiéndose por pautas y objetivos adquiridos en una fase biológica de la evolución en la que resultaban necesarios, sin tener en cuenta que ahora sus manos tienen la fuerza de un gigante.

Vivirnos en un mundo de profundos cambios; nuestros ojos ven una nueva Tierra, pero nuestros deseos siguen arraigados en el pasado. La ciencia y las posibilidades de la técnica han traspasado ya el segundo umbral, pero nuestro pensamiento, nuestra moral, nuestro código social y nuestras metas todavía están determinadas por los principios vigentes en la fase biológica. En esta falta de armonía entre los deseos de antaño y las capacidades del mañana va haciéndose cada vez más tensa la situación de la humanidad (que se encuentra cerca ya de la ruptura). *Éste es nuestro verdadero problema.*

Hasta ahora el hombre nunca había dispuesto de tantos conocimientos y técnicas, pero tampoco se había encontrado en tal situación de desconcierto e incertidumbre en cuanto a sus metas y valores morales. Por primera vez en la historia, pueblos enteros viven en la abundancia. Pero la evolución hacia una sociedad industrial no proporciona seguridad espiritual ni una visión optimista del futuro. Todos los signos anuncian tormenta: hambrunas a nivel mundial que parecen ser irremediables, revueltas, revoluciones y terror por todas partes, y, como fondo, la amenaza de la guerra nuclear: un infierno apocalíptico de dimensiones inimaginables. No nos dejemos engañar por los acostumbrados tanques y cañones que los expertos militares consideran aún «vitales»; esa guerra que nos acecha no será como las anteriores.

Los problemas que se nos avecinan no pueden ser resueltos con los instrumentos del pasado, y tampoco con la nueva tecnología; y no se solucionarán simplemente alterando los marcos políticos, es decir, sólo por la instauración de una u otra democracia. Quien se aferre a tales esperanzas aún no ha comprendido las verdaderas causas de nuestros problemas. La política sólo afecta a las manifestaciones superficiales; el problema es mucho más profundo. La crisis de la humanidad es una crisis intelectual. *Mientras no alteremos los fundamentos de nuestro pensamiento, nada cambiará.*

Mientras en nuestro planeta siga imperando la violencia, no habrá solución. La violencia y el miedo han de ser superados a la vez, puesto que la agresión sólo adquiere fuerza frente al miedo.

La humanidad vive en una nave espacial pequeña y desvalida, cuyos dispositivos biológicos comienzan a fallar cuando los intelectuales aún no funcionan del todo. Sólo podrá estabilizarse si sus tripulantes comprenden que sus ansias de poder, su avaricia y su eterno miedo a «los de más allá de las montañas» son actitudes reminiscentes de su pasado biológico. Este pasado pesa sobre la nave como una losa y amenaza echarla a pique.

Los instintos y las tendencias de los animales habían sido necesarios para la conservación de las especies y tenían sentido para su evolución. Condujeron hasta el umbral de la fase intelectual, pero no más allá. A lo largo de la evolución, lo que en el pasado había resultado beneficioso se convirtió en dos ocasiones en un peligro mortal para las estructuras pertenecientes a una fase más elevada. Las descargas eléctricas, las erupciones volcánicas o las radiaciones eran factores esenciales para la formación de estructuras materiales, pero se convirtieron en una amenaza para las estructuras biológicas que llegaron a configurarse. Cada nueva fase de la evolución necesita medios más delicados, menos rudos, para desarrollarse.

La segunda vez, la amenaza era la necesidad primitiva y desenfrenada de autorreproducción de los organismos unicelulares. Cuando llegaron a formarse los organismos pluricelulares, el «yo» de antaño tuvo que transformarse en un «nosotros». También entonces los organismos, las células, tuvieron que aprender a supeditar su egoísmo a un orden superior.

La evolución se encuentra de nuevo ante una situación similar. Se acaba la fase biológica; también para el hombre. La tendencia a matar a miembros de la apropia especie se ha convertido en una amenaza para todas las culturas. Ahora es el momento de eliminarla.

Pero, ¿puede el hombre escapar a su destino biológico? ¿Hay alguna posibilidad de superar la forma de pensar del pasado? ¿Acaso no predican continuamente los etólogos que el hombre, desde el punto de vista genético, sigue siendo un animal que todavía adopta comportamientos agresivos y gestos de sumisión para apaciguar al adversario, y que todos sus instintos y deseos —de los que surgen sus intenciones y metas— están arraigados en la información genética heredada? ¿Es posible que pueda saltar sobre su propia sombra? ¿Puede cambiar el ser humano?

Estos y otros argumentos parecidos encuentran bastante aceptación porque proporcionan una excusa excelente para libramos de nuestra responsabilidad. Pero tales argumentos eluden el problema principal por dos motivos: en primer lugar, nuestros instintos están en gran medida sometidos al control de (nuestra inteligencia. Y, en segundo lugar, la amenaza a nuestra existencia no se deriva directamente de nuestros instintos animales, sino de su extensión a una esfera —aún no perfeccionada— de decisiones intelectuales. Pero aclaremos un poco más nuestras dos razones.

Empezaremos aceptando el hecho de que todavía hoy los instintos basados en la información genética del hombre influyen sobre su comportamiento. Las amenazas desencadenan agresiones; la excitación sexual, deseo. Pero pensar que estos instintos escapan al control intelectual es un grave error. Que una discusión termine en pelea, una disputa matrimonial en asesinato, o una relación entablada en una fiesta en violación, no dejan de ser *casos excepcionales*, desviaciones perseguidas por la justicia. En la mayoría de nosotros, incluso en situaciones muy extremas, prevalece la razón. Y la razón ha creado además un sistema de control social que no permite que las regresiones a determinados instintos animales queden impunes. Que este sistema castigue el homicidio cuando en situaciones excepcionales —en la guerra— impone el asesinato como obligación, no significa que los instintos sean superiores a la razón. Y aquí enlazamos con nuestra segunda consideración.

Nadie puede creer que los constructores de la bomba de hidrógeno, los miembros del Estado Mayor que estudian su utilización más efectiva o los pilotos que finalmente se encargan de lanzarla, estén actuando dominados por sus instintos animales. La amenaza a la existencia humana no reside en un posible desencadenamiento espontáneo de los instintos animales, sino en una fría decisión tomada por una mente calculadora. Pero esa mente piensa de un modo que, dado el grado de desarrollo de la técnica, carece de sentido.

La codicia, el ansia de poder y el miedo están presentes en el período de transición de la evolución biológica a la intelectual. Pero estas emociones humanas pueden ser manipuladas intelectualmente. Es posible despertar deseos y suscitar el miedo. Y esto resulta fácil porque para conseguirlo sólo hay que mantener despiertos acontecimientos ya pasados. La eliminación de estas emociones costará bastante esfuerzo, pero no es imposible. En cualquier caso, no exigiría una alteración del patrimonio genético del hombre.

Además, no todos los componentes del hombre son negativos para su futuro. El cuidado altruista de los hijos, la disposición a ayudar a los congéneres, la paciencia y la tolerancia ante la torpeza o las travesuras de los niños, son también atributos humanos determinados genéticamente que, en un momento dado, fueron necesarios para la conservación de la especie. Se trataría, entonces, de ampliar el campo de aplicación de estos instintos «positivos».

El hombre no es una estructura defectuosa que haya llegado a un callejón sin salida. El gran problema al que se enfrenta la humanidad —la conjunción de pautas de pensamiento del ayer y tecnologías futuristas— no es más que una etapa de transición inevitable: sin esos instintos de origen genético el hombre no habría llegado al umbral de un nuevo mundo. Y puesto que toda la humanidad es portadora del pensamiento moral, mientras que son sólo unos cuantos científicos los que impulsan el desarrollo tecnológico, no es extraño que se produzca una situación crítica. Debido a la amplia base en que se apoyan, las pautas de pensamiento evolucionan mucho más lentamente que las posibilidades técnicas. Un adelanto técnico

es obra de unos pocos; una evolución espiritual exige la convicción de muchos.

Pero si el hombre no llega a comprender hasta qué punto los adelantos de la técnica han alterado los fundamentos de su existencia, si no trata de cambiar los pilares de su pensamiento, puede provocar la destrucción de todas las culturas que existen sobre el planeta. El primer intento de llegar a la fase intelectual habría fracasado, habría conducido a la autodestrucción.

Esto no significaría el final de toda evolución. Los pocos humanos que consiguieran sobrevivir tendrían que volver a empezar, habiendo experimentado un retroceso tal vez de diez mil, mil o quizá sólo de cien años. En el peor de los casos, la fase biológica tendría que tomar una dirección completamente nueva. Quizá fueran entonces las ratas o los delfines quienes, tras un período de 50 o 100 millones de años, se encontraran a punto de traspasar ese segundo umbral de la evolución.

Existe la posibilidad de que se produzca este segundo intento, puesto que el actual grado de desarrollo de nuestras técnicas de destrucción todavía permite conservar la esperanza de que no se produzca una *total* aniquilación de la vida en la Tierra. La diversidad de las formas de vida es demasiado amplia para que esto pueda ocurrir. Para la evolución en un sentido global, el destino de la humanidad es algo secundario. Es un intento, tal vez fallido, pero en cualquier caso repetible.

Pero para los seres humanos que vivimos ahora, y para nuestros hijos y los hijos de nuestros hijos, la disyuntiva «aniquilación masiva o estabilización» es de vital importancia. El destino se halla en nuestras manos.

La comprensión y el humanitarismo —cualidades que caracterizan al hombre de la fase intelectual—, ¿pueden ser rápidamente difundidos? ¿Hay entre nosotros suficientes personas dispuestas a dedicarse a lo que en estos momentos resulta esencial: a sacrificarse personalmente y a transformar su miedo en confianza y esperanza?

Sólo unidos superaremos ese pesimismo tan extendido que se refleja en la frase «no tiene ningún sentido», que suele utilizarse como excusa para eludir cualquier responsabilidad

que pueda alterar nuestra vida. La fase intelectual exige un hombre «verdaderamente humano». Es decir, que el hombre tiene que aprender a pensar *de forma responsable hacia el resto de la humanidad.*

El hombre tiene que convertirse en lo que sueña ser desde hace tanto tiempo. Es una tarea titánica, tan titánica como la potencia de la información intelectual. *El ser humano tiene que comprender que está ante una nueva fase de la evolución. La única situación similar a ésta se dio hace* ya *miles de millones de años.*

21. LA LIBERTAD A TRAVÉS DE LA DEPENDENCIA

> «Sólo es libre aquel que se somete a la razón por propia voluntad.»
>
> SPINOZA

Nuestro recorrido a lo largo del proceso evolutivo nos ha conducido al presente. Hemos visto el umbral crítico ante el que se encuentra la humanidad. Aún no está claro si el hombre va a conseguir superar este período de inestabilidad, o si hará falta otro intento para llegar a la tercera fase de la evolución. En cualquier caso, merece la pena mirar hacia el futuro e intentar proyectar sobre él el desarrollo pasado de la evolución.

Algunos pueden pensar que este intento es demasiado pretencioso. ¿Acaso la evolución no es un acontecer *histórico* basado en el azar y —en su tercera fase— también en la voluntad del hombre? ¿Cómo va a ser posible prever su desarrollo?

En primer lugar, es importante que nos demos cuenta de que, incluso en situaciones que dependen del azar, es posible hacer pronósticos siempre que los acontecimientos se desarrollen dentro de un marco de condiciones determinadas. Vamos a tratar de aclarar esta aseveración con dos ejemplos:

Al tirar repetidamente un dado, no podemos predecir *cuando* aparecerá el primer seis, pero sí que esto *ocurrirá* alguna vez.

También podemos decir que la muerte es un hecho seguro que tiene lugar al final de toda existencia humana, aunque sea el azar lo que determine en cada caso cuándo, dónde y por qué causas se produzca.

Las condiciones internas requieren una sistemática que nos permite, a pesar de la intervención del azar, hacer algunas

predicciones generales. Sin embargo, aún no conocemos bien las condiciones que acompañarán a una fase de evolución intelectual en nuestro planeta. ¿Es esto un obstáculo insalvable a la hora de adelantar un análisis de la situación? Hasta ahora habíamos tratado de exponer nuestros argumentos y consideraciones de un modo científico; ¿tendremos ahora que apartamos del terreno científico y entrar en el de la ciencia-ficción?

Consideremos brevemente algunos aspectos del método científico:

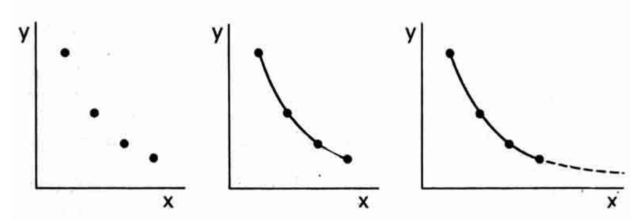
Todas las ciencias naturales se basan en la uniformidad, continuidad, universalidad y constancia de los fenómenos naturales; es decir, en la posibilidad de hacer generalizaciones. Sin esta uniformidad de la naturaleza —demostrada miles de veces en la práctica— no sería posible desarrollar ninguna ciencia ni ningún razonamiento lógico.

Por ejemplo, el físico M. midió en California, en 1930, la carga elemental de algunos electrones. Los resultados obtenidos por M. fueron corroborados por B. y F. en un lugar diferente, y también por los físicos L. y H. en otro lugar. Los resultados de las pruebas sobre muestras escogidas al azar son considerados suficientes para hacer la generalización de que *todos* los electrones en *todos* los lugares de nuestro planeta —e incluso del Universo— tienen la misma carga en *todo* momento: $2 = 1{,}602 \bullet 10^{-19}$ culombios. Mientras no se realicen otras observaciones que vengan a demostrar lo contrario, los físicos de todo el mundo seguirán utilizando esta cifra en sus cálculos.

Otro ejemplo; la biología distingue hasta 1.600.000 especies de animales y plantas. Las leyes de los mecanismos moleculares de transmisión hereditaria han sido comprobadas hasta la fecha en no más de 1.000 especies (y en la mayoría de los casos de forma incompleta). Sin embargo, los biólogos están convencidos de que *todos* los seres vivos de nuestro planeta se sirven de los mismos procesos moleculares para la transmisión hereditaria de sus caracteres. Mientras no se descubra un organismo que presente un funcionamiento diferen-

te, esta generalización basada en un reducido número de pruebas seguirá siendo válida.

Cuando se mide una relación de dependencia entre dos variables se obtienen inicialmente sólo unos cuantos puntos (obsérvese el primer diagrama). Estos puntos suelen unirse trazando una curva; se supone que los resultados de pruebas posteriores tenderán a seguir la misma relación de dependencia (segundo diagrama).



Los científicos se atreven incluso a extrapolar resultados, es decir, a prolongar la curva según la relación de dependencia hallada (tercer diagrama). Esto se admite como pronóstico científico siempre que no sea posible realizar pruebas dentro de ese sector y no haya argumentos que demuestren que en el sector de extrapolación los resultados tengan que ser distintos.

Así pues, es necesario demostrar que la continuidad puede interrumpirse, mientras que no es necesario justificar la aceptación de un desarrollo continuo de la relación de dependencia. Mientras no se demuestre lo contrario, esta continuidad será la mejor solución.

Siempre que los seres humanos se encuentran ante un acontecimiento incomprensible, los prejuicios suelen sustituir la falta de conocimientos. Así, toda la bóveda celeste giraba alrededor de la Tierra; la enfermedad de una persona se debía al mal de ojo; la ciudad había sido destruida por culpa de una maldición.

Cuando se aplica el método de la extrapolación a la evolución, alcanzamos sectores en los que abundan los prejuicios. En cuestiones de sociología, desarrollo y comportamiento humanos, todos nos atrevemos a emitir juicios, sin comprender que generalmente no son más que prejuicios basados en

nuestras emociones. La historia demuestra que la mayoría de los prejuicios del hombre provienen de que siempre se remite a sus experiencias y observaciones directas.

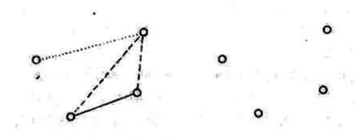
Pero si pretendemos tratar la cuestión del futuro de la humanidad de forma científica tenemos que basarnos —mientras no haya pruebas de una discontinuidad— en que el orden y la regularidad que se han dado durante cientos de miles de años seguirán produciéndose en el futuro.

La evolución no es simplemente un proceso histórico, puesto que está sometida a las leyes de la naturaleza y a ciertas limitaciones. La evolución se desarrolla siguiendo un principio básico determinado por una situación cósmica inicial y supeditada a las características de la materia y de las estructuras que de ella se originan.

Pero, ¿cuál es ese principio básico que podemos utilizar para considerar la evolución futura?

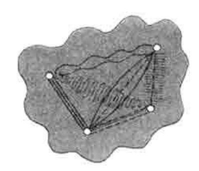
Es el principio de la continua unión de elementos independientes para construir estructuras más complejas: unidades de un orden y una potencia superior.

Al seguir el hilo evolutivo hemos encontrado este principio una y otra vez. Lo hemos denominado «integración») Ahora queremos volver a describir y analizar por última vez este fenómeno fundamental. Imaginemos algunas unidades independientes.



Una integración comienza a producirse cuando estas unidades establecen alguna relación entre sí, cuando surgen dependencias, relaciones recíprocas; cuando se establecen conexiones. Como resultado de estas primeras conexiones se producen nuevas relaciones recíprocas, de forma que las unidades independientes van estando cada vez más afectadas por estas interrelaciones y por las características del resto de los elementos asociados. Se va produciendo una adaptación a medida que las unidades anteriormente independientes se van

convirtiendo en elementos básicos acoplables que se hacen cada vez más interdependientes, hasta que, finalmente, quedan «integrados en una nueva unidad de un orden superior con nuevas posibilidades. Éste es el principio básico que se repite constantemente en la naturaleza.



La independencia o el individualismo son conceptos que tienen en nuestro pensamiento un valor tan positivo, que la idea de que esta descripción del proceso de integración sea aplicable también al futuro de la humanidad puede provocarnos angustia. Pero este rechazo espontáneo desaparecerá al considerar más detenidamente ese futuro.

La red se empezó a tejer hace ya mucho tiempo; la creciente interdependencia de los seres humanos y las limitaciones que esto implica para el individuo van a ser precisamente —por muy paradójico que parezca— la causa de una ampliación del margen de libertad del hombre.

La creciente dependencia del individuo del resto de los miembros de la sociedad es una realidad incuestionable. Esta dependencia comenzó en los albores de nuestra historia con la especialización del individuo en la ejecución de determinadas tareas; con la *división del trabajo.* La división del trabajo fue el punto de partida de todo incremento de la productividad y tuvo como consecuencia el desarrollo de toda una gama de oficios. Cada uno de nosotros se ha hecho dependiente del trabajo de miles de personas. ¿Cómo podríamos vivir sin electricidad, ni transportes, ni recogida de basuras? ¿Cómo viviríamos si cada uno tuviera que cultivar sus alimentos y fabricar todos sus utensilios?

Además, la dependencia va aumentando a nivel internacional. Los conocimientos técnicos y la necesidad de materias primas han conducido al establecimiento de una red de comunicaciones mundial. Las estadísticas del mundo económico

reflejan una intensificación de las redes comerciales internacionales. La interdependencia se produce primero a nivel individual, después a nivel regional y. por último, a nivel internacional. El deseo de mejoras materiales y de tener acceso a los productos de consumo desarrollados por el ingenio humano conduce a una mayor dependencia. Puestos a elegir entre una mayor dependencia en una situación de bienestar y una mayor libertad en la pobreza, los hombres eligieron inconscientemente la división del trabajo en los albores de la historia; hoy se ha decidido por la interdependencia económica. La integración sigue su curso.

La sociedad industrial que nos proporciona una vida más fácil y cómoda exige la integración del individuo en el sistema. Si no se cumpliera esta exigencia el sistema se derrumbaría y el hombre perdería la libertad de movimientos que ha conquistado. Ahora tenemos que pagar impuestos, ir a la escuela, respetar las señales de tráfico, tener un documento de identidad y pasar un examen si queremos conducir. Son consecuencias de la integración que el hombre de antaño no conocía. Pero estas limitaciones de nuestra libertad son también la *base* de una mayor libertad de movimientos. El coche, por ejemplo, es el resultado de un trabajo conjunto, es decir, de una dependencia. Podemos tomar conciencia de ello cada vez que se nos acaba la gasolina. Para llegar a nuestro destino ilesos tenemos que permitir que nuestra libertad quede restringida por las señales de tráfico. Cualquier persona con sentido común advertirá que éstas son consecuencias necesarias de nuestra mayor libertad de movimientos.

El sistema posee mecanismos automáticos que fomentan la intensificación de las interrelaciones de la humanidad sin que sea necesaria una decisión consciente por parte del individuo. Así es como va aumentando nuestra libertad de movimientos. Incluso los que permanecen ajenos a las modas que arrastran a las masas, incluso quienes se sienten plenamente conscientes de su individualidad, tienen que admitir que su existencia se basa en el entramado social, tanto en el aspecto material como en el espiritual.

El desarrollo de la humanidad se produce dentro de un marco de libertad autolimitada. Para mantener la funcionalidad del sistema son necesarias ciertas imposiciones del Estado y de la ley destinadas a reprimir los comportamientos arbitrarios y egoístas del individuo. Por otra parte, es necesario un margen de libertad que permita la acción individual, las nuevas ideas. Éstas serán —como las mutaciones en la fase biológica— los gérmenes que harán posible un desarrollo global. Sólo ellas pueden crear un mayor margen de libertad para todos.

Estas consideraciones pueden haber creado la impresión de que nos referimos principalmente al desarrollo industrial y a la cooperación en lo material. Sin embargo la base fundamental del desarrollo futuro son las interrelaciones intelectuales. Entre ellas se produce el entramado decisivo.

Desde el surgimiento del idioma los cerebros humanos han ejercido una influencia recíproca cada vez más intensa. Gracias al lenguaje se fueron definiendo y adaptando los conceptos, lo que ha hecho posible la difusión de los conocimientos y el intercambio de ideas. Así es como el arte y la ciencia se han convertido en patrimonio cultural de toda la humanidad. Esta integración intelectual es el proceso más importante de nuestra evolución.

¿Conducirá esto a la desaparición de la individualidad? ¿Acaso no nos sentimos absorbidos por el sistema y completamente adaptados a él? ¿No nos sentimos bombardeados por las mismas publicaciones y los mismos programas de televisión? ¿No consumimos el mismo «alimento intelectual», del mismo modo que compramos los mismos productos de consumo? ¿Ha habido alguna vez una tendencia al igualamiento intelectual tan fuerte como ahora? ¿Es inevitable la eliminación de cualquier indicio de individualidad?

Esta forma de pensar es errónea. Se trata precisamente de todo lo contrario. ¿Cómo? Pues bien, la individualidad es la singularidad del individuo, su diferenciación de los demás. Los seres humanos de una misma época siempre han tenido conocimientos parecidos, han pensado de forma similar, y han

sentido y actuado de un modo semejante. Cualquier cazador primitivo conocía la técnica de reducir a un mamut. Cualquier recolector sabía reconocer las bayas venenosas y buscar determinados vegetales. La lucha por la existencia no dejaba al hombre primitivo demasiado margen para desarrollar su individualidad. Lo que sabía uno, lo sabían prácticamente todos. Las habilidades estaban muy difundidas y el comportamiento estaba regulado por determinados ritos tribales. Sólo al surgir un entramado social en el que se acentuó la división del trabajo, el hombre fue consiguiendo algo de tiempo de ocio dedicado a la estética, a lo que no era esencial, a ocuparse de sí mismo; a sentirse individuo.

Desde entonces, los conocimientos de la humanidad han aumentado de tal forma, que en el cerebro del individuo sólo tiene cabida una pequeña parte de ellos. Esto ha hecho que los hombres sean más diferenciables que antes. Uno sabe mucho sobre el teatro italiano de la Edad Media, otro sobre la historia de la revolución rusa, otro del fútbol en Brasil; habrá hombres que sepan sobre el funcionamiento de unos altos hornos, sobre los ciclos económicos, sobre el arte de los indios hingit, sobre música, sobre los aspectos comunes de todas las religiones, sobre el comportamiento de los pingüinos, sobre los cambios en el sistema jurídico de la nueva China, sobre las reservas de mercurio existentes, sobre el cultivo de rosas, las canciones de los trovadores o las enfermedades oculares. Pero nadie sabe «todo» lo que «se sabe» sobre un campo determinado del conocimiento. Cualquier ser humano que tenga interés puede llegar a ser un experto en determinada especialidad y saber sobre ella más que las personas que le rodean.

Pero la individualidad no se refleja sólo en los conocimientos intelectuales. También se puede coser muñecos de trapo con retales, coleccionar sellos, aprender cocina china, tocar el violín, jugar al ajedrez o al tenis, esquiar o tallar piedras. Uno puede ser carpintero o carbonero, aficionado a jugar a los bolos o a la jardinería; o varias cosas a la vez. El aumento progresivo del margen de libertad del hombre deja cada vez más tiempo para el desarrollo de la individualidad.

Por tanto, al intensificarse la integración el hombre no tiene por qué convertirse en una hormiga intelectual. Al contrario, el entramado abre cada vez más campos y fomenta un continuo desarrollo de esa estructura gigantesca y variopinta en continua diferenciación que denominamos «humanidad».

La integración del individuo en una unidad compleja de un orden superior se está produciendo rápidamente. Formamos parte hasta tal punto de un sistema superior, que no podríamos soportar durante mucho tiempo un aislamiento como el de Robinson Crusoe. Hasta Robinsón contó con la ayuda de instrumentos y armas producidas por esa sociedad de la que se vio separado por el azar.

Todos los indicios demuestran que las leyes de la evolución siguen vigentes. Por tanto, si la humanidad consigue tener una visión clara del futuro y evita su autodestrucción, la integración que se ha iniciado podrá continuar, impulsada por el propio automatismo del sistema, en dirección hacia una unidad armoniosa.

Pero esta integración, que comenzó hace miles de años y que aún está por concluir, es mucho más que una interrelación de los seres humanos. Todas las estructuras materiales y biológicas del planeta serán integradas en el sistema intelectual que denominamos *humanidad.* ¡Todas!

La evolución biológica está llegando a su fin. Las plantas y los animales que nos proporcionan alimento o placer pasan a formar *parte del sistema.* Se convierten en elementos básicos que asumen cierta función en el entramado intelectual y, por tanto, son mantenidos por ese mismo entramado. Al igual que ya se han integrado hace tiempo las patatas, los gatos, los bueyes, las rosas, el trigo y los periquitos, *todas* las restantes criaturas también acabarán por integrarse en éste *gigantesco ser planetario.*

Todas las estructuras de nuestro planeta se integrarán en un gigantesco «organismo intelectual»; en uno solo. Para resaltar su singularidad queremos denominar a esta estructura «MONÓN».

El sistema de comunicaciones del planeta es el sistema nervioso del monón. Las plantas, los animales, las minas y las

fábricas son sus órganos; la humanidad con todos sus museos, teatros, salas de conciertos, Instituciones, bibliotecas, ordenadores e iglesias, constituye la estructura parcial encargada de dirigir y desarrollar sus conocimientos y sentimientos.

Creemos —probablemente con razón— que los humanos tenemos más sentimientos que los animales. La estética, el sentido de la belleza es uno de los atributos típicamente humanos. La lógica del cerebro se ha desarrollado paralelamente a la profundidad de las sensaciones. La religión, el arte y la ciencia no son contradictorios, sino partes complementarias del futuro sistema. También los sentimientos son estructuras; la música es una estructura; y los cuadros, y los poemas. El monón no es de ningún modo un superordenador. Su esencia es la armonía de la razón y los sentimientos.

La existencia individual del hombre alcanzará en el monón una elevación hoy inimaginable. En cualquier estadio de la evolución, el desarrollo conducía a una mayor diversificación y a una mayor estructuración. Lo que en principio era igual o parecido se va diferenciando, a través del surgimiento de nuevas interrelaciones, para dar lugar a una gran profusión de formas. La evolución conduce a una diversificación, no a un igualamiento. En ningún caso la evolución ha dado lugar a la uniformidad a partir de la diversidad.

El hombre, como parte integrante del monón, disfrutará de una libertad más amplia garantizada por una responsabilidad común hacia el todo; no solo respetará la riqueza que supone la individualidad, sino que pondrá todo su empeño en aumentarla.

En el monón todos los esfuerzos estarán dirigidos a lograr el máximo desarrollo armonioso de la multiplicidad de estructuras.

Definido de forma científica, el monón es el resultado de la integración final y omnímoda de la evolución de nuestro planeta. El monón es una estructura gigantesca desarrollada a lo largo de la historia, constituida por materia organizada biológicamente. Es una unidad supraindividual cuyos órganos (o estructuras parciales) tienen una relación de cooperación mutua y con la totalidad del sistema.

El concepto «monón» describe —al igual que «animal un estado *general* de complejidad estructural altamente desarrollaba. La posible diversidad de las características individuales de una estructura de este tipo es inconmensurable, y tan *impredecible* como las características especiales de un «animal», que podría ser tanto una libélula como una jirafa. Estos detalles sólo pueden ser resultado de un proceso histórico de desarrollo con participación del azar.

Por otra parte, la propia dinámica del sistema determina ciertas características generales. La más importante es, sin duda, la armonía interna .del monón, es decir, el equilibrio entre todas las tendencias opuestas de sus estructuras parciales. Para conseguir tal estabilidad, el monón tendrá que superar los antagonismos surgidos de la lucha biológica por la supervivencia que, en el presente, subsisten como egoísmo, sed de poder y agresiones entre grupos sociales y pueblos. Sin llegar a esa estabilidad, una sociedad de seres intelectuales como la nuestra no llegará a ser un/monón. Sin la existencia de una armonía interna, la sociedad intelectual no puede durar mucho tiempo.

La violencia de la fase biológica y *las posibilidades técnicas de la fase intelectual sólo podrán coexistir durante un breve período de transición.*

Tal combinación resultaría a largo plazo letal para el desarrollo intelectual del planeta. Lo que hasta ahora habíamos llamado «integración» equivale a esta «armonización», es decir, a la superación del pasado.

El concepto «monón» define la fase intelectual final del desarrollo. Sea cual fuere el comienzo y las estructuras y derivaciones que se hayan producido en un planeta determinado, siempre que la evolución material haya conducido a una evolución biológica, y ésta haya desembocado en una evolución intelectual, el resultado sólo puede ser una única y gigantesca estructura: ¡sólo una!

¿Significa esto el fin de toda evolución?

22. PERSPECTIVAS

> «Cuanto más humano se va haciendo el hombre, con más afán deseará que su esfuerzo le lleve tan sólo hacia algo nuevo, sin límites e indestructible.»
>
> TEILHARD DE CHARDIN

La competencia comenzó con los primeros signos de vida. En la fase que precedió a la evolución biológica se produjo una diversificación de las estructuras: surgieron estructuras más o menos estables, pero no se daba una competencia entre ellas. La competencia fue una consecuencia automática del principio de la vida, de la autoduplicación de las estructuras. No todas las estructuras conseguirían sobrevivir. ¿Cuáles lo lograrían?

Una mayor rapidez y exactitud en la autoduplicación fueron los primeros resultados de la competencia. Después vendría una mayor eficacia en el metabolismo, para poder superar «la crisis energética». Más tarde, lo importante era conquistar a la hembra y espacio vital para el desarrollo de la especie.

Competencia, siempre competencia. Sólo así, a través de la selección de los más aptos, fue posible el desarrollo del cerebro. Con ello se inició la competencia por conseguir el procesamiento de estímulos más eficaz; la competencia por conseguir la inteligencia más eficiente.

De este mar de competencia surgió el hombre. Él sería quien introduciría el asesinato en su propia especie, el homicidio, convirtiéndose así en instrumento de la selección. La tribu más inteligente era la que conseguía sobrevivir. Para poder dedicarse a la caza y a la guerra, el hombre tenía que encontrar placer en la lucha, en ser el vencedor, y en vanagloriarse de ello una y otra vez. La combatividad, el orgullo, el gusto en competir; estas tendencias eran fomentadas por la selección.

Este gusto por competir llevó al hombre a inventar el deporte. Asoció su gusto por competir con su deseó de bienestar. El resultado de esto es lo que denominamos economía de mercado. Competencia por conseguir prestigio e influencia en la política, en la vida profesional, en la vida amorosa. La humanidad ha llegado a su actual estado de desarrollo gracias a ese afán de competencia, pero ahora la competencia ha empezado a dejar de ser fuente de placer. ¿Cómo será en el futuro?

Todas las estructuras del planeta se han integrado en el moñón. Las partes que constituyen una unidad no pueden competir unas con otras. El hígado no compite con el bazo. Los oídos complementan a los ojos. El corazón, los pulmones y el cerebro colaboran para conseguir un bienestar general. El monón es un ser intelectual. Su desarrollo no es material, sino espiritual. Los problemas internos se resuelven entre todos y en beneficio de todos, y pasan a un plano secundario. El nuevo mundo de ideas ya no puede ser un mundo de competencia en el sentido biológico. Beethoven no compite con Bach, Hölderlin no rivaliza con Planck.

Las estructuras de las ideas no son unidades independientes y aisladas como los seres biológicos. Cada idea tiene sus raíces en muchas otras ideas, está estrechamente relacionada con ellas. Las ideas religiosas, las ideas comunistas, la idea de la evolución; todas están sujetas a continuos cambios, a una constante renovación a través del contacto con otras ideas y con el creciente tesoro de experiencia de una humanidad sabia. No hay nada más nefasto para las ideas que el aislamiento el encorsetamiento impuesto por el dogma. La idea dogmática es como un organismo sin capacidad de mutación; está condenada a la extinción. Habrá siempre otras ideas que continuarán desarrollándose y acabarán por desplazarla. En el monón solo puede —y debe— existir un único dogma: que no puede haber dogmas.

Pero sin competencia ni rivales, ¿cómo va a seguir desarrollándose el monón? ¿Cómo evitará caer en la degeneración? ¿Estamos al final de toda evolución?

Entre las gallinas y los chimpancés hay una diferencia intelectual enorme. Podemos hacer un experimento: si se les ofrece comida a la que sólo pueden llegar dando un rodeo, ¿qué hace la gallina? Corre excitada de un lado a otro de la alambrada, sin darse cuenta de que yendo un poco más allá podría rodearla.

¿Y el chimpancé? Se sienta, observa la situación. Después trepa, se sube por la cuerda, llega hasta el otro lado, se mete por el agujero y, al fin, consigue coger el plátano.

El chimpancé ha pensado. Se ha imaginado que trepando por aquí... no, por aquí no puedo llegar; por ahí... no, tampoco; pero por allí sí, dando un rodeo... Y sólo después de esto ha entrado en acción. El chimpancé ha *simulado* en su cerebro las posibilidades de acción que se le ofrecían. Pero no empieza a trepar inmediatamente; primero se ha *imaginado* cómo treparía por aquí o por allá.

De eso se trata precisamente: de la *simulación*. Éste es el método de la fase intelectual. El monón utilizara la simulación del desarrollo de diferentes procesos para poder decidir qué dirección le conviene tomar. Durante la fase biológica las nuevas alternativas (en forma de mutaciones) tenían que someterse «en carne y hueso» a la competencia. Era la selección la que decidía si una variante era más o menos apropiada que las anteriores.

En la fase intelectual, las alternativas futuras podrán ser comparadas por los cerebros con ayuda de los computadores; alternando las diversas condiciones se obtendrán diferentes resultados, de modo que podrá escogerse la solución óptima y ponerla en práctica. Este sistema es mucho más económico y rápido que el heroico sistema biológico, en el que raramente se llegaba a conseguir un avance fortuito.

La simulación de procesos psicológicos y económicos ha empezado a practicarse desde hace algunos años, y se ha convertido en uno de los métodos científicos más importantes. Tal vez de su perfeccionamiento dependa el destino de la humanidad.

Cuando en el capítulo 20 hablábamos de la necesidad de comprender la situación en que se encuentra nuestro planeta,

y manifestábamos la esperanza de poder pasar a la tercera fase de la evolución en este primer intento, nuestro optimismo se basaba en que, de hecho, en el cerebro de muchas personas ya se está produciendo un proceso de simulación de este tipo. Toda esperanza se basa hoy en este nuevo principio al que denominamos simplemente «razón».

Pero, ¿volvería a surgir la competencia en nuestro monón si se llegara a descubrir que en otro planeta de otro sistema solar se ha llegado a formar otro monón que estableciera contacto con nosotros? ¿Podría haber otros monones en nuestra galaxia?

Las opiniones están divididas: algunos científicos están plenamente convencidos de que en otros lugares del universo —al parecer en muchos planetas— tiene lugar una evolución biológica e intelectual como la nuestra; en cambio, otros consideran que esta idea es fruto de la fantasía. Mientras no se establezca ningún contacto con otras estructuras intelectuales del espacio, esta cuestión permanecerá abierta. Esperaremos hasta el capítulo 25 para hablar de los pros y de los contras que presentan tales ideas.

Hasta entonces queremos considerar como mera *suposición* la existencia de «ETIS» (Extra-Terrestrial Intelligent Structures, Estructuras Inteligentes Extra-Terrestres). Los «etis» serían también monones individuales surgidos por evolución biológica en diferentes planetas. (Y para conservar una seriedad científica, tenemos que partir de que los procesos evolutivos se desarrollan universalmente siguiendo los mismos principios básicos.) Esta suposición implica aceptar la posibilidad de establecer algún tipo de contacto entre diferentes monones.

A pesar de que hay autores de cierto renombre que han descrito con gran fantasía —como variante moderna de las novelas clásicas de aventuras— posibles encuentros de este tipo en los albores de la historia de la humanidad, tales especulaciones no merecen demasiado crédito. Vamos a demostrar por qué.

Hay unos cien mil millones de estrellas en cada una de las cien mil millones de galaxias (100.000.000.000 × 100.000.000.000). Suponiendo que existieran tecnologías que permitieran alcanzar una velocidad aproximada a la de la luz, un viaje hasta la estrella más cercana duraría varios años. Por tanto, un millón de naves espaciales de exploración podrían llegar a visitar en 10.000 años sólo una centésima parte de todos los sistemas solares de *su* galaxia. Para ello cada una de las naves espaciales debería llevar a bordo —aunque fueran de propulsión atómica— millones de toneladas de combustible. ¡Cuánta preciosa energía tendrían que invertir los etis en esas expediciones!

Pero, ¿no podría ser que su planeta fuera mucho, mucho más grande que nuestra Tierra, y que dispusieran de enormes reservas de energía? Con toda seguridad ¡no! Un planeta que tuviera una masa miles de veces mayor que la Tierra, es decir, un diámetro solamente entre 10 y 20 veces mayor, sería un cuerpo estelar. Según la materia de que estuviera compuesto, o estaría muy caliente por el comienzo de reacciones nucleares en su interior, o tendería a comportarse como una enana blanca que iría reduciendo su volumen hasta alcanzar un diámetro muy reducido. En ninguno de los dos casos sería posible la existencia de vida sobre su superficie. Por otra parte, el planeta de los etis tampoco podría ser mucho más pequeño que nuestra Tierra, puesto que, de ser así, su fuerza de gravedad no habría podido retener el agua y los gases que hacen posible el comienzo de la vida en un caldo primario. Por tanto, si existen estos etis en algún lugar del Universo, tienen que vivir en planetas de dimensiones muy parecidas a las de nuestra Tierra.

Además, si hubieran llegado a desarrollar técnicas que permitieran largos viajes espaciales —aunque fuera sólo dentro de su galaxia—, probablemente tendrían suficiente sentido común para darse cuenta de lo descabellado que sería emprender una expedición de ese tipo en busca de otros seres.

Está claro que nuestros hermanos espaciales nunca han estado aquí.

También está claro que la humanidad nunca intentará enviar expediciones «al tuntún» a otros sistemas solares.

¿Significa esto que los monones nunca llegarán a entrar en contacto? No, en absoluto. Hasta ahora sólo hemos hablado de la posibilidad de transportarse cubriendo distancias interestelares o incluso intergalácticas. Pero sería posible establecer contacto por otros medios; por ejemplo, por radio, utilizando señales que se propagaran a la velocidad de la luz.

Entre los científicos que se plantean esta posibilidad, una de las cuestiones más debatidas es la de la duración que puede tener una civilización planetaria. Éste es un factor muy importante para nuestras consideraciones: si las posibilidades de encontrar otro monón son de por sí bastante reducidas, para que se pudiera establecer una comunicación sería necesario además que ambas estructuras existieran en un mismo período de tiempo. Si un monón tuviera una vida media de unos 10.000 años, por ejemplo, podría darse el caso de que, a lo largo de un millón de años, se sucedieran 100 monones en una misma galaxia sin que fuera posible una comunicación. De ahí que la falta de sincronía en la existencia pueda ser una dificultad aún mayor que la distancia.

Dado que nuestro propio desarrollo no está suficientemente avanzado, todas nuestras suposiciones acerca de las características del monón son tan vagas que no podemos permitimos aventurar ningún cálculo en cuanto a la vida media de estas estructuras. Es posible que incluso la idea de la «muerte» de un monón sea completamente absurda, puesto que esta idea está basada en fundamentos completamente biológicos. Tal vez sólo exista este peligro en la fase inicial. Tal vez la estructura pueda emigrar a otros sistemas planetarios, a otros soles, cuando comiencen a agotarse las reservas de energía de los suyos, o cuando amenacen con explotar. No hay manera de saberlo.

Sin embargo, podemos hacer una afirmación. Y es una afirmación muy importante, sobre todo teniendo en cuenta que las novelas y las películas de ciencia-ficción nos están transmitiendo ideas erróneas que tienen una base biológica. Se puede afirmar con toda seguridad que nunca se producirán

guerras entre diferentes planetas. Nunca. ¡El Universo no es el «Salvaje Oeste»!

La seguridad con que hacemos esta afirmación se basa también en la dificultad de que se dé un desarrollo sincrónico en dos planetas diferentes. ¿En qué estadio de evolución nos encontrábamos hace 10.000 años? ¿Dónde estamos hoy y dónde estaremos (suponiendo que superemos el peligro de la autodestrucción) dentro de 10.000 años? En comparación con los miles de millones de años que ha durado la evolución biológica, la evolución en la fase intelectual (gracias al sistema de «simulación») será tan rápida, que si llegara a producirse un contacto entre un monón y un planeta inteligente pero aún en vías de desarrollo, la diferencia de nivel sería tal que el monón se limitaría y. a sonreír ante cualquier intento de agresión por parte del otro planeta, y, ¿acaso intentaría un monón agredir a un «niño»? Nuestra seguridad no se deriva sólo de una concepción moral, sino que es una consecuencia inevitable de las características internas del sistema: un monón que haya alcanzado la *estabilidad* tendrá forzosamente que haber superado la agresión y el miedo transformándolos en armonía. Sin embargo, la probabilidad de que un planeta en una situación como la nuestra llegue a alcanzar el grado de desarrollo de un monón es incalculable. De todos modos, desde un punto de vista cósmico, mientras se produzcan suficientes intentos, esta cuestión carece de importancia. También la evolución biológica fue un derroche.

Así pues, si en algún momento se llega a establecer un contacto por telecomunicación —ésta es la única posibilidad en realidad— entre dos planetas inteligentes, lo más probable es que, debido a la falta de sincronía de sus desarrollos, uno de ellos sea un monón y el otro esté en un estadio «infantil». No hace falta que digamos qué papel desempeñaría la Tierra en un contacto de este tipo. No se establecería un diálogo. Lo que se establecería sería una intensa corriente de información que nos dejaría sin aliento.

Ése sería el DÍA más importante en la historia de la evolución de nuestro planeta.

No habría otro día comparable en significado, aunque tardáramos siglos, milenios, o incluso más tiempo, en comprender mínimamente las lecciones de nuestros maestros cósmicos.

Como hemos visto, un diálogo resultaría en principio imposible. Debido a la velocidad limitada de la transmisión de las señales, pasarían muchos años antes de que nuestros maestros cósmicos recibieran el «acuse de recibo». Podrían pasar hasta 10.000 años y. si se encontraran en otra galaxia, incluso millones de años. Esto significa que lo más probable es que la comunicación interestelar, o intergaláctica, se desarrollara en *una sola dirección.*

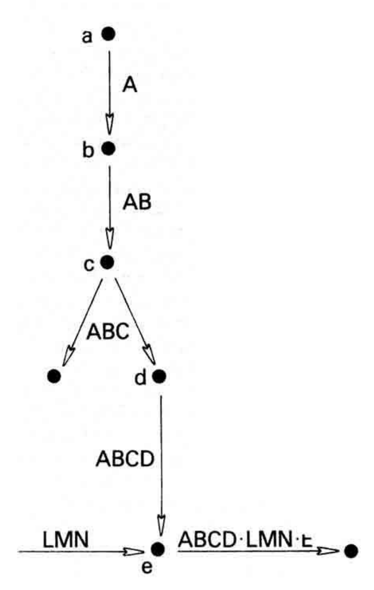
La transmisión de información entre monones sería semejante a una creciente cascada de información: comenzaría en algún lugar y en algún momento, y sería precisamente el comienzo —al igual que en otras fases de la evolución— lo más difícil, el problema principal.

En principio, todo monón pasaría por una fase en la que trataría de captar señales de otros monones: estaría a la escucha sin decir nada. Si ese intento no diera ningún resultado a pesar, tal vez, de siglos y siglos de atención, podría surgir el escepticismo, cosa que no fomentaría el deseo de emitir señales. Seguramente, incluso se abandonaría el intento de captar señales de otros.

Así pues, es probable que el comienzo del flujo de información cósmica se encuentre con un obstáculo considerable. Sería necesario que un monón estuviera tan convencido de la existencia de otros monones, a pesar de no tener ninguna prueba de ello —es decir, a pesar de no haber recibido ninguna señal—, que se dedicara a emitir señales durante un largo período de tiempo. Tal vez insistiría porque esperara que se hubiera dado la feliz coincidencia de que hubiera otro planeta inteligente en su sistema solar, tal vez el éxito de ciertos experimentos de laboratorio le hubieran inducido a hacerlo, o tal vez una determinada actitud científico-filosófica le impulsara a continuar emitiendo señales.

Sea como fuere, imaginemos un segundo monón, «b», que capta la información, «A», emitida por el primer monón, «a».

La situación ha cambiado radicalmente. Junto a otras informaciones, el monón «b» recibe la sensacional noticia de su «no-exclusividad». Este conocimiento supondría una fuerte motivación para emitir señales. La información que puede ahora transmitir «b» es, aparte de esa noticia sensacional, la suma de conocimientos «AB», es decir, la información que ha recibido, «A», enriquecida con sus propios conocimientos, «B».



Un monón «c» ampliaría la información captada «AB» con sus propios conocimientos, convirtiéndola en «ABC». Podría darse el caso de que dos o más planetas fueran «instruidos» por un mismo monón. Pero aún más importante que la formación de una cadena de creciente información, sería la unificación de dos cascadas de información.

Así se va configurando una nueva «torre»; un torrente, de información intelectual.

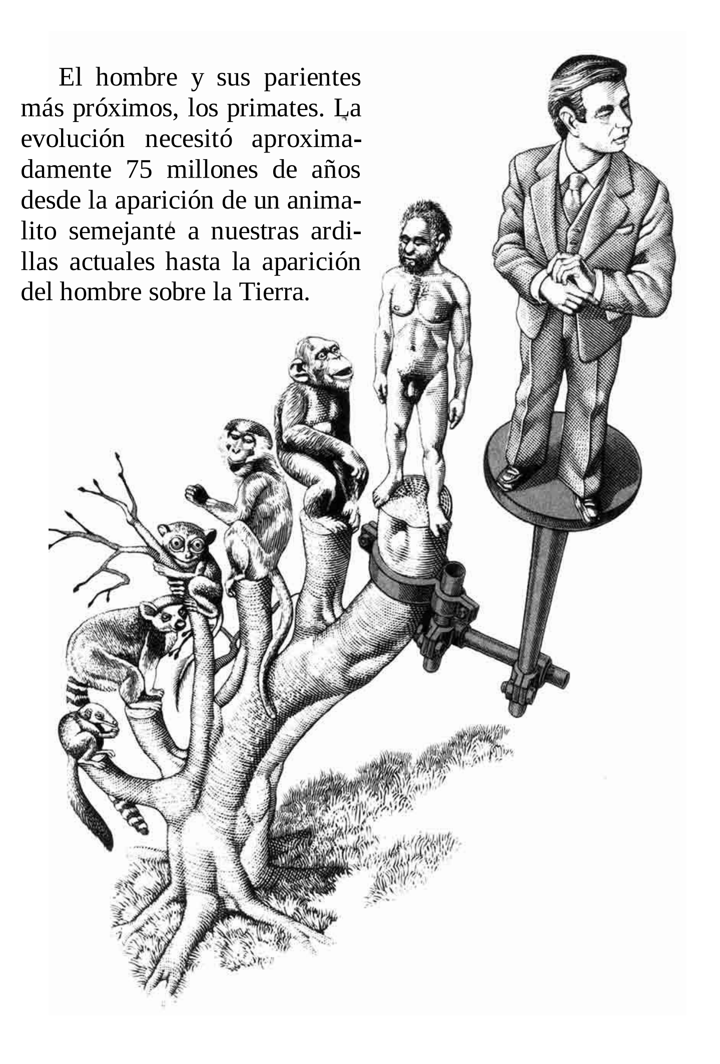
La influencia de las estructuras, limitada hasta ahora a su entorno inmediato, *habrá llegado a superar distancias interestelares o incluso intergalácticas.*

Volvamos de nuevo la vista atrás y consideremos cómo se formó una progresión de estructuras en aumento a partir de los comienzos de la evolución: unas cuantas partículas elementales, 92 tipos de átomos, y luego, miles de moléculas. La fase biológica mostró la misma tendencia: aumentar la variedad de las estructuras mediante constantes ramificaciones, producir nuevas especies. Al entrar en la fase intelectual la fuerza integradora unifica la gran diversidad de estructuras del planeta; después entran en contacto sistemas inteligentes de diferentes planetas...

La red de información tejida por los monones iría extendiéndose ininterrumpidamente, convirtiendo el Universo en una estructura única y omnímoda. Éste sería —hasta donde alcanzamos a imaginar— el fin de la evolución: *la integración cósmica.*

SINOPSIS

El hombre y sus parientes más próximos, los primates. La evolución necesitó aproximadamente 75 millones de años desde la aparición de un animalito semejante a nuestras ardillas actuales hasta la aparición del hombre sobre la Tierra.



Este dibujo de Bill Sanderson se publicó por primera vez el 13-V-1976 en la portada del *New Scientist,* Londres, semanario de ciencia y tecnología

23. ¿FINALIDAD O SINSENTIDO?

«Sólo la esfera de la naturaleza formada se ocupa constantemente de su propia expansión.»

KANT

Hemos ido siguiendo el hilo rojo evolutivo hasta el presente. La evolución comenzó en las brillantes estrellas con la integración de las partículas elementales y, a través de los átomos, las moléculas y los agregados, nos llevó hasta la fase de la biología, hasta el mundo de las estructuras autoduplicantes. Por una integración gradual se fueron configurando estructuras cada vez más complejas y con más capacidades. Con el sistema nervioso central la complejidad alcanza el umbral de las estructuras gigantes capaces de registrar información, y llega a su cima con los cerebros de una humanidad que domina a todas las demás estructuras materiales y biológicas. El planeta ha entrado finalmente en una fase intelectual de la evolución, para convertirse gradualmente en un monón cuyo desarrollo sólo podemos imaginar.

Una vez dicho todo esto, ¿qué queda por discutir? ¿Qué podemos añadir? Ahora, en estos últimos capítulos, queremos hacer un balance intelectual, es decir, llegar a ciertas conclusiones. En este capítulo consideraremos si la evolución es un proceso que tiene o no una meta, y en el capítulo siguiente analizaremos si el proceso de crecimiento y diversificación de las estructuras es compatible con los principios de la termodinámica (cap. 24). También consideraremos si la evolución es un fenómeno inevitable (capítulo 25). Finalmente, en el epílogo dejaremos a un lado el análisis científico para buscar el sentido espiritual del hombre.

El progreso de las ciencias naturales se ha basado principalmente en una descripción cuantitativa y en la explicación de determinados procesos y relaciones. Sin embargo, cuando

se trata de la evolución, cualquier cuantificación es incompleta, puesto que, si bien es posible comparar la dimensión de las estructuras, no hay medidas que permitan establecer su grado de complejidad o influencia. ¿Qué expresamos de lo esencial al decir que una escultura de bronce pesa 2,8 kg, o que una partitura se compone de 4.200 notas? La dimensión es una de las características de las estructuras, pero sólo una. (Cuanto más compleja es la estructura, menos sentido tiene expresar meramente sus dimensiones.

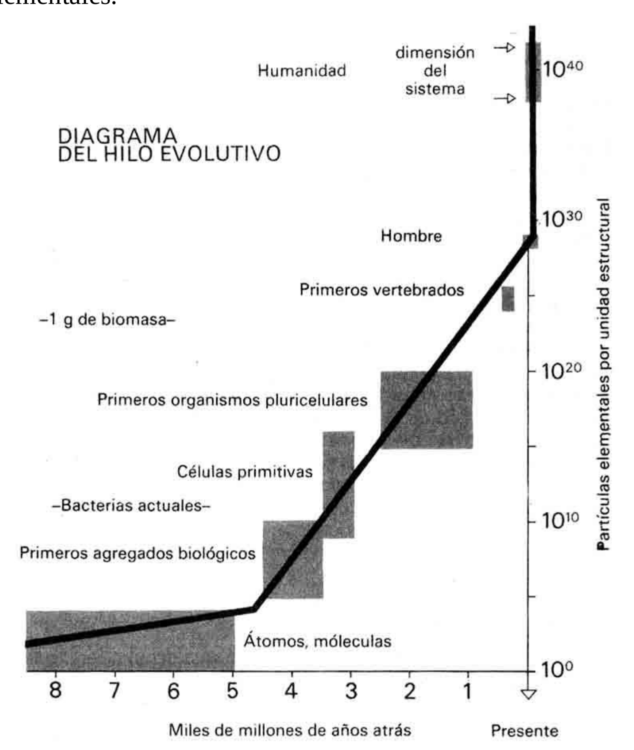
A pesar de todo, queremos tratar de estimar las dimensiones de las unidades estructurales según los diferentes grados de evolución, para establecer aproximadamente cuándo aparecen por primera vez nuevas estructuras y de cuántos elementos básicos se componen. Para ello, limitaremos nuestro análisis al reino animal.

Nuestro punto de partida es extremadamente impreciso. Sabemos que la edad del Universo se sitúa entre 13.000 y 20.000 millones de años. No sabemos a ciencia cierta cuándo surgieron las primeras estrellas ni cuándo se formaron los primeros átomos y moléculas (comienzo de la configuración de estructuras). Sólo podemos suponer que la formación de átomos y moléculas abarcó un amplio período de tiempo. La cantidad de elementos básicos por estructura va desde las dos partículas elementales del átomo de hidrógeno hasta las primeras estructuras moleculares compuestas por unas mil partículas elementales.

En nuestro planeta, que se formó hace 4.600 millones de años según los científicos, los primeros agregados —primeros comienzos del proceso de autoduplicación— surgieron hace unos 4.000 millones de años. Sin embargo, bien pudo ser hace 4.500 o 3.500 millones de años. Estos agregados estaban compuestos por más de 200 cadenas de elementos básicos, lo que equivale a unas 10^5 partículas elementales.

Hace entre 3.500 y 3.000 millones de años surgieron los primeros organismos unicelulares estructurados, muy semejantes a las bacterias. Los fósiles más antiguos que se han encontrado estaban en rocas de unos 3.000 millones de años, como las de la Formación de Fig Tree (en Swazilandia, África

del Sur). Al medir las diversas magnitudes de las células primitivas que se encontraron en esa formación rocosa se pudo constatar que se componían de 10^9 a 10^{16} partículas elementales.



Puesto que los organismos unicelulares fueron aumentando de complejidad y a la vez de volumen (llegando a tener un volumen unas cien veces mayor que el de una bacteria), los primeros organismos pluricelulares tuvieron que ser de diez a millones de veces mayores que una de aquellas células primitivas. Los primeros organismos pluricelulares aparecieron hace de 1.000 a 2.500 millones de años.

Hace unos 400 o 500 millones de años existía ya una gran variedad de animales pluricelulares, que hemos llegado a

conocer por sus restos fósiles. De aquella época datan también los primeros cordados. Se trata de peces cuya longitud era de 3 a 30 cm. Puesto que un gramo de agua contiene aproximadamente 3×10^{22} moléculas, compuestas cada una de 28 partículas elementales, y el material biológico tiene aproximadamente la misma densidad que el agua, un gramo de «biomasa» contiene unas 10^{24} partículas elementales. Los primeros cordados eran de 3 a 300 veces mayores. El *ser humano*, que apareció sobre la Tierra hace de 2 a 5 millones de años, contiene una cantidad de elementos básicos de 5×10^{28} (y cada vez está más claro lo insatisfactorio que resulta hacer una estimación de este tipo).

Si en una visión futurista nos permitimos imaginar a la humanidad como un intrincado sistema de elementos interrelacionados, podríamos calcular que ese sistema llamado *humanidad* se compone de 2×10^{38} partículas elementales. Si queremos incluir además los edificios, las fábricas, los vehículos y todo el reino animal, el sistema global, es decir, toda la materia sometida al control de la información intelectual de la humanidad, habría que multiplicar esta cifra aproximadamente por mil.

Para poder representar estas estimaciones en nuestro «diagrama del hilo rojo evolutivo», tenemos que anotar los valores en forma de potencias de diez. La recta representa una curva exponencial. Puesto que la curva está construida a partir de potencias de diez, no cambiaría mucho si consideráramos otros valores estimados. Incluso si introdujéramos las estimaciones correspondientes a los gigantescos saurios, o a las ballenas, sus puntos sólo estarían ligeramente por encima de la curva.

Pese a la imprecisión de las estimaciones, el diagrama permite observar claramente tres diferentes fases en la evolución. El sector medio de la curva, que corresponde a la fase biológica, muestra un aumento exponencial, es decir, una ampliación cada vez más rápida del tamaño de las estructuras. De las otras dos fases no podemos afirmar lo mismo con seguridad. Sin embargo, puede verse que la curva presenta una inflexión al final de cada fase, es decir, que la aceleración

exponencial aumenta aún más al pasar de una fase a otra. Podemos calcular cuánto tiempo es necesario por término medio para que se produzca la duplicación del tamaño de la estructura:

En la fase material, 500.000.000 de años; en la fase biológica. 50-60.000.000 de años; en los comienzos de la fase intelectual, tal vez 100.000 años.

Vemos, pues, que la evolución no sólo muestra un continuo crecimiento de las estructuras, sino también una progresiva aceleración de este proceso.

Aún más importante es el aumento de complejidad y potencial dinámico de las estructuras, si bien no es posible *cuantificar* dicho aumento.

Después de esta breve introducción estamos en condiciones de abordar el tema crucial de este libro.

Pocas cuestiones han levantado tantas polémicas en los debates sobre el carácter de la evolución, como la de «azar o predeterminación», «espontaneidad o intencionalidad».

¿Acaso la formación del mundo es fruto de los caprichos del azar? La evolución, ¿va a la deriva como un barco sin timón arrastrado por los vientos, o se rige por unas leyes cósmicas ineludibles y, según un plan determinado, se dirige paso a paso hacia una meta que aún no es visible, y que tal vez nunca lo llegue a ser?

Consideremos primero una *cuestión parcial* que, por sí sola, ya es suficientemente complicada: ¿es direccional la evolución, o sea, es un proceso que se desarrolla en una dirección apreciable y constante, o no es más que un deambular de aquí para allá, un devenir sin sentido? Confiamos en que esta preguntad sorprenda al lector, puesto que de todas las observaciones de la naturaleza que hemos presentado en este libro se deriva la comprensión de que:

LA EVOLUCIÓN ES, AL MENOS HASTA EL PRESENTE —COMO DEMUESTRA LA EXPERIENCIA ACUMULADA POR TODAS LAS RAMAS DEL SABER HUMANO— UN PROCESO ACELERADO DE DESARROLLO DE ESTRUCTURAS. LA EVOLUCIÓN SE ORIEN-

TA EN UNA DIRECCIÓN SIEMPRE CONSTANTE: UNA DIRECCIÓN QUE CONDUCE A NIVELES DE ORGANIZACIÓN CADA VEZ MÁS COMPLEJOS DE LA MATERIA DE NUESTRO PLANETA.

Sin embargo, en muchos libros que tratan el tema de la evolución podemos encontrar opiniones muy diferentes, por lo que vamos a detenemos a analizar los motivos que han llevado a algunos científicos a formular argumentos como éstos:

«La evolución... no presenta ninguna tendencia finalista; no supone ningún progreso automático o universal.»

(JULIAN HUXLEY)

«Los indicios que sugieren la idea de una evolución dirigida hacia una meta desaparecen según van aumentando nuestros conocimientos.»

(HEBERER)

«El Universo no llevaba en sí la vida, ni la biosfera llevaba en sí al hombre. Nuestro número salió por casualidad en este juego de azar.»

(MONOD)

«Los *cambios evolutivos no se orientaron en ningún momento en una sola dirección... la idea de una corriente principal o línea directriz en el progreso evolutivo es completamente artificial.»*

(SIMPSON)

Estos argumentos se alejan bastante de las conclusiones que habíamos sacado en nuestro balance. Tiene que haber más de un malentendido. ¿Serán estos malentendidos de naturaleza puramente semántica? ¿Se deben a términos como «meta» o «finalidad»?[3] ¿O se trata verdaderamente de una diferencia de opiniones? Tal vez se trate de las dos cosas.

---

[3] Con frecuencia estos conceptos suelen ser expresados mediante la utiliza-

Pensemos primero en el significado de *finalidad.* El juego del ajedrez, por ejemplo, tiene una finalidad (dar jaque al contrario), aunque existan muchos caminos para conseguirlo y muchas posiciones de jaque una vez se ha llegado a la meta. Un trabajo científico dirigido a solucionar un problema concreto tiene una finalidad, aunque, naturalmente, la solución no se conozca de antemano. Ni siquiera una carrera de 100 metros tiene como meta un punto determinado; la meta es una línea y hay que correr en dirección a ella.

En este sentido, la evolución también tiene una finalidad, aunque no haya nadie capaz de describir con detalle qué es un monón o una red de monones. Al igual que en un juego de ajedrez o en un trabajo científico el proceso se desarrolla históricamente por caminos que no están predeterminados, porque —debido a una organización interna, a unas determinadas reglas de juego— su desarrollo goza de una libertad restringida.

El concepto de finalidad no implica el conocimiento detallado de la situación final ni que haya que seguir un camino prefijado. Ni siquiera la intervención o influencia del azar impide que un proceso siga cierta dirección. Por ejemplo, si un piloto de avión situado en el Polo Norte dejara que una ruleta fijara el rumbo de su vuelo y mantuviera esa dirección constante, sobrevolaría primero el ecuador (por cualquiera de sus puntos) y llegaría, con toda seguridad, al Polo Sur. Las características del globo terráqueo harían que la intervención inicial del azar careciera de importancia.

El concepto de «finalidad» tampoco implica «la seguridad de llegar a una meta». La travesía del Atlántico supone una finalidad, pero alguna de las embarcaciones participantes puede ser víctima de una catástrofe y no llegar a su destino.

Entonces, ¿por qué la mayoría de los biólogos dicen que la evolución no tiene finalidad ni dirección?

Presumiblemente, argumentos como los que hemos citado son resultado de un rechazo inconsciente a una ideología que

---

ción de términos cultos como «finalístico» o «teleología».

consideraría al hombre como «finalidad predeterminada» de todo desarrollo. Pero esto es una confusión. «Finalidad» no significa que los *seres humanos* —o cualquier otra estructura— sean la «coronación del proceso evolutivo». Para evitar semejante presunción no hace falta prescindir de toda idea de finalidad.

El camino de la evolución puede pasar por los peces, reptiles, mamíferos y seres humanos, pero también por otros seres diferentes completamente desconocidos para nosotros, llámense «Ronates, Sabitas, Hefalumpos o Etis».

Que la evolución se oriente en una dirección no quiere decir que el hombre haya estado proyectado de antemano, pero sí que, mediante un proceso de integración gradual, la magnitud, eficacia e influencia de las estructuras vaya aumentando constantemente, y que en ese proceso de desarrollo surjan primero las estructuras capaces de autoduplicarse, luego las estructuras con capacidad de registro y, finalmente, la unificación de toda la diversidad de estructuras de un planeta en una única estructura gigantesca bajo el control de la información intelectual.

Esta unificación de todas las ramificaciones de las estructuras para formar primero un monón y después —si la vida no es un fenómeno aislado— una red cósmica de información intelectual, es la *«finalidad»* de la evolución. Si el principio básico del Universo —la progresiva integración de las estructuras en constante desarrollo— no se altera de forma profunda y repentina, *ésta es la única línea de pensamiento lógica.*

Pero los biólogos que estudian la evolución no pueden estar ciegos. Hablan constantemente de un desarrollo hacia formas de vida «superiores». Tendrán que disponer de datos y argumentos que justifiquen su enérgica negación de que exista una finalidad en la evolución. Por supuesto que disponen de argumentos. Esencialmente son los cuatro que vamos a considerar a continuación desde un punto de vista crítico.

Primero: las mutaciones se producen sin ninguna finalidad.

Es cierto que entre la gran diversidad de alteraciones que sufren las especies se producen también desarrollos regresivos que provocan la atrofia o degeneración de determinados órganos o funciones. Los animales de las cavernas, por ejemplo, suelen tener los ojos atrofiados. Esto es una consecuencia del *carácter fortuito* y *sin finalidad de las mutaciones.* Las alteraciones se producen en todos los sentidos (¡inexactitud!) y, como ya hemos resaltado a lo largo de este libro, raras veces tienen como consecuencia una mejora. Pero *la evolución solo se produce por la combinación de estas intervenciones del azar con el principio de la selección natural,* que es una consecuencia automática de la autoduplicación de las. estructuras. La evolución no es fortuita: *lo fortuito es lo que se selecciona.*

Un animal que vive en una caverna sin luz no necesita ojos. Por tanto, sin la presión de la selección, también los mutantes con ojos atrofiados conseguirán sobrevivir. Puesto que es mucho más probable que un error en el ADN provoque defectos en vez de mejoras, las mutaciones degenerativas podrían cuajar mucho más rápidamente que las positivas. La presión ejercida por la selección natural no sólo es necesaria para un desarrollo progresivo, sino también para mantener el nivel de complejidad alcanzado.

Cuando aún no se conocía el fenómeno de las mutaciones, los biólogos creían que la falta de utilización de un órgano causaba su degeneración. Se pensaba, por ejemplo, que vivir en una cueva oscura provocaba *directamente* la atrofia de los ojos. Observaciones como ésta han llevado a los científicos que estudian la evolución a hacer hincapié en la falta de finalidad de la «evolución», cuando en realidad deberían hablar de la falta de finalidad de las «mutaciones».

Segundo: los «fósiles vivientes».

Es verdad que la evolución no conduce a *todas* las especies, en *todo* momento y lugar, hacia un *continuo* desarrollo. En la actualidad existen bacterias probablemente muy pareci-

das a sus antepasadas de hace dos mil millones de años. Los cangrejos de las Molucas (o cacerolas de las Molucas) son los descendientes de animales que existieron exactamente con las mismas características hace más de 200 millones de años, como demuestra la comparación de los ejemplares vivos con los fósiles encontrados. El celacanto o latimeria, un pez en camino de convertirse en un cuadrúpedo terrestre, fue capturado vivo hace pocos años.

La existencia de tales «fósiles vivientes» ha llevado a conclusiones un tanto equívocas, por ejemplo, a decir que «la evolución no es un proceso universal que se desarrolle continuamente en una misma dirección». Aquí conviene que recordemos que el concepto de «evolución» abarca la totalidad del proceso y no sólo los progresos realizados individualmente por las especies. Evidentemente, no todo animal, planta o especie da los mismos pasos evolutivos en la misma dirección. Los que hayan conseguido una buena adaptación y la sigan conservando, por casualidad, a pesar de las alteraciones de su medio ambiente, podrán sobrevivir en este estado de adaptación ideal a lo largo de muchos millones de años.

Tercero: la continua diversificación de las especies.

Es cierto que la evolución no juega con una sola carta. No permite que sea una sola especie la que se perfeccione más y más. La evolución persigue su meta por muchos caminos, y a esto, si se quiere, podría llamársele «falta de finalidad». Sin embargo, todas las ramificaciones no son más que intentos de acercarse a la meta, de obtener una mayor diferenciación y complejidad. Las ramificaciones son parte fundamental del método que emplea la evolución para alcanzar esa meta.

Las transformaciones experimentadas por la corteza terrestre y la falta de exactitud en la autoduplicación conducen inevitablemente a la diversificación; con cada nueva ramificación aumenta la probabilidad de que avance el proceso global.

La evolución se basa en el azar. Pero esto no significa automáticamente una falta de dirección. Recordemos que la dinámica inherente al sistema se combina con la influencia del azar (recordemos nuestro vuelo al Polo Sur).

Cuarto: extinción de ramas evolutivas.

Es verdad que los saurios gigantes, y también otras ramas evolutivas que en principio habían tenido éxito, se extinguieron en cierto momento. También es cierto que especies que habían permanecido en un segundo plano hasta cierto momento, de repente tomaron el relevo en el proceso evolutivo. En este sentido puede decirse que *«el progreso evolutivo no es universal ni lineal»*. Pero en realidad lo que estamos considerando no son más que «experimentos» de la naturaleza que no resultaron viables frente a determinados cambios del medio ambiente, aunque los períodos de prueba nos parezcan extraordinariamente largos. El fracaso de estos «experimentos» provocó la extinción de ramas evolutivas enteras. Las especies extinguidas presentaban caracteres heredados de sus antepasados que, en un nuevo medio ambiente, resultaron letales. Pero, ¿basta esto para afirmar que la evolución no sigue ninguna dirección?

Sólo mediante el estudio de numerosos detalles aislados hemos llegado a obtener una visión amplia del fenómeno de la evolución. Pero, aunque para el estudio científico sea necesario concentrarse en detalles o épocas concretas, no hay que perder la visión de conjunto. Al parecer, a los científicos los árboles les impiden ver el bosque.

¿O es que no quieren verlo?

Puede ser que los argumentos que hemos expuesto sean superficiales y que haya una causa más profunda. Quizá los biólogos temen inconscientemente admitir una finalidad en el proceso evolutivo, puesto que esto conduciría a plantearse preguntas como «¿y hacia dónde se dirige todo esto?», o «¿qué o quién determina esa dirección?»

Según Scouts y Ockman, no hay peor herejía para las leyes tácitas del estudio de la naturaleza que enlazar las observaciones científicas con ideas religiosas. Sin embargo, una vez se ha llegado a sospechar una finalidad en el proceso evolutivo, la razón encontrará sin dificultad el modo de superar este escollo. Y *ésta* es, al parecer, la causa profunda de la resistencia a admitir una realidad tan palpable.

El rechazo intuitivo de la existencia de una finalidad en el proceso de desarrollo de las estructuras está apoyado también en las posturas de ciertos físicos y químicos. Desde su punto de vista, la evolución sólo podría desarrollarse en el sentido contrario: hacia la «muerte térmica» de todo el Universo. Consideraremos esta cuestión en el capítulo siguiente.

24. EL FANTASMA DEL CAOS: UN MALENTENDIDO DE LA FÍSICA

> «... Reconociendo que es sumamente delicado hacer deducciones generales basándose en consideraciones que van más allá de la experiencia, tenemos que admitir que la consecuencia que se desprende de la segunda ley de la termodinámica es poco satisfactoria y que sería necesario encontrar una explicación más conveniente.»
>
> BOLTZMANN

Siguiendo el hilo rojo evolutivo hemos ido viendo el continuo desarrollo de las estructuras en todos los confines del Universo. Si aplicamos este principio más allá de lo que nos es conocido hasta el momento, veremos que nos conduce hacia estructuras cada vez más complejas y, finalmente, a una integración total en una única estructura. Pero esta idea es contestada por muchos científicos que, basándose en la segunda ley de la termodinámica, pronostican el aumento del desorden en la naturaleza. Algunos dicen que el desarrollo de la vida, desde un punto de vista universal, no es más que una contradicción efímera y local y que muy pronto desembocará en la creciente corriente del desorden. Estos científicos consideran que la situación final de nuestro Universo no puede ser más que el caos.

De algún modo tiene que haberse producido un malentendido, un error. Un continuo desarrollo sólo puede conducir a una meta: o el caos o la estructura. ¿Hacia dónde vamos en realidad?

La segunda ley de la termodinámica ha sido formulada de varias maneras, dependiendo de los puntos de vista que se pretendía resaltar. En relación con la evolución todas las interpretaciones vienen a decir lo siguiente:

La energía aprovechable que se encuentra libre en el Universo va disminuyendo continuamente.

O también: todo sistema aislado evoluciona hacia un mayor desorden.

Vamos a analizar con más detalle ambas afirmaciones comparándolas con la idea de un desarrollo progresivo y constante de las estructuras. La primera afirmación está en desacuerdo con la idea de un desarrollo ilimitado de las estructuras; la segunda se basa en un malentendido y, por tanto, es errónea.

Una advertencia al lector no muy versado en ciencias naturales: si hasta el presente no se ha parado a reflexionar sobre estas cuestiones, debería, sencillamente, saltarse este capítulo. O, al menos, no preocuparse si algunas de las explicaciones que damos le son difíciles de comprender. En este capítulo sólo tratamos de aclarar un malentendido muy difundido en círculos científicos que se opone a la idea de que se dé un desarrollo continuo de las estructuras.

La energía se manifiesta de formas muy diversas. Está, por ejemplo, en la masa de un vehículo en movimiento, en las cargas eléctricas, en el carbón y en el petróleo; pero también el calor de una máquina de vapor destinada a levantar pesos, es decir, a realizar un trabajo. La energía puede transformarse. Sin embargo, la cantidad de energía es la misma antes y después de cualquier transformación. Ésta es la denominada primera ley de la termodinámica.

El calor se produce por el movimiento desordenado o la vibración de las moléculas. En el proceso de transformación de la energía el calor desempeña un importante papel. La energía calorífica contenida en un gas o en un cuerpo sólido sólo puede ser transformada en trabajo, es decir, en otras formas de energía, si existe un desnivel térmico. Esto significa que la transformación sólo puede darse si existe otro cuerpo más frío cuya temperatura vaya aumentando en el proceso de transformación y aprovechamiento de la energía. Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre los cuerpos, más

energía calorífica podré aprovecharse para producir trabajo. Sin un desnivel térmico no se producirá energía aprovechable. Si no fuera así, se podría obtener energía mediante un enfriamiento del medio ambiente. Esto es lo que dice, en principio, la segunda ley de la termodinámica. Las dos leyes han sido comprobadas por innumerables experimentos físicos y químicos, pero no se deducen de ningún otro principio fundamental.

Puesto que cuando la energía se transforma hay una parte que se desprende en forma de energía calorífica (la fricción, por ejemplo, transforma parte de la energía mecánica en calor), a largo plazo, una parte creciente de la energía total del Universo pasaría a convertirse en calor. Esta energía calorífica se perdería gradualmente al irse nivelando la temperatura de todos los cuerpos por el efecto de la continua irradiación de calor, hasta que todos los cuerpos del Universo hubieran alcanzado la misma temperatura. Este supuesto «estado final» es lo que se ha denominado —ya desde el pasado siglo— «la muerte térmica del Universo».

Podríamos decir que al producirse una transformación de energía hay que pagar una especie de «impuesto»; un tributo a beneficio del caos. Según las argumentaciones de algunos científicos, a muy largo plazo, todo el «capital en circulación» llegaría finalmente a ser absorbido por el «fondo tributario», puesto que no se crea nuevo capital y tan sólo una pequeña parte de esos tributos es aprovechada y puesta de nuevo en circulación. La falta de capital circulante —la falta de desnivel térmico entre los diferentes cuerpos— paralizaría por completo la economía: se habría producido la muerte térmica del Universo. Éstas son, al parecer, las consecuencias de las leyes fundamentales de la termodinámica.

Pero, ¿es inevitable esta «muerte por entropía»? ¿No hay salvación? ¿Son los múltiples desarrollos de las estructuras simplemente una manifestación transitoria, un juego de azar, que «al final» desembocará en el caos del que originalmente surgió? Dado que las estructuras necesitan energía para conservarse y desarrollarse, ¿es inevitable que su desarrollo se

paralice finalmente a causa de una última y definitiva crisis energética universal? Casi parece ser así.

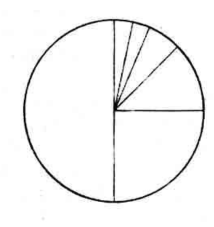
PERO:

Desde sus primeros momentos de existencia nuestro Universo —según han podido calcular los físicos— sólo ha consumido (irradiado) un porcentaje muy reducido de sus reservas energéticas. ¿Y de dónde salió toda la energía inicial? Estaba dada porque en «un principio» todas las partículas elementales eran independientes. No debemos pasar por alto este hecho: al principio no existían estructuras, no existía información, pero ¡el Universo estaba repleto de energía!

La formación de las partículas más pequeñas, las partículas α, y la de los núcleos atómicos más elevados produjo enormes cantidades de calor. Al igual que miles de millones de estrellas, nuestro Sol irradia esa gran cantidad de energía al espacio. La formación de los átomos tiene que pagar unos impuestos muy elevados. Al configurarse las estructuras moleculares, es decir, al establecerse los enlaces químicos, vuelve a liberarse energía calorífica. Pero en una cantidad millones de veces menor que la que se desprende en las fusiones nucleares. El tributo pagado al caos se ha reducido considerablemente.

Las reacciones bioquímicas que, mediante los enzimas, hacen posible el aumento de la complejidad estructural, son mucho más eficaces, es decir, utilizan la energía de que disponen las moléculas de forma mucho más ahorrativa. En comparación con las reacciones de la química inorgánica, sus impuestos son mucho menores. Finalmente, los cerebros producen estructuras de máxima eficacia y mínima tributación: algo que era desconocido hasta entonces.

Todo parece indicar que con el aumento del grado de complejidad de las estructuras, los «impuestos» descienden visiblemente. Estudiando la evolución podemos ver que las estructuras emplean cada vez más ahorrativamente el patrimonio energético; cuanto mayor es su desarrollo más capaces son de difundirse y ampliarse con menos gasto —tributo— de energía.



Sea como fuere, el proceso de formación y desarrollo de estructuras puede seguir pagando —de su dote inicial de capital energético— tributos al caos durante millones y millones de años. ¿Tal vez eternamente? Nadie puede calcularlo. A un Universo infinito le correspondería una infinita reserva de energía. Además, no podemos saber qué nuevas facultades lograrán desarrollar las estructuras del futuro. Tampoco las primeras bacterias fueron capaces de tener en cuenta temas como la «desgravación fiscal». Nuestro Universo se halla todavía muy lejos de haber alcanzado el equilibrio. Sus estructuras son aún tan primitivas que resulta absurdo intentar hacer predicciones hasta el «fin de los tiempos» a la luz de nuestros conocimientos presentes. El continuo descenso de la energía existente no es necesariamente contradictorio con un desarrollo ilimitado de las estructuras.

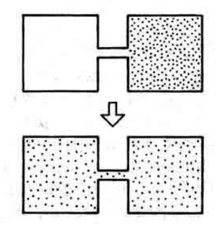
Consideremos ahora la segunda afirmación, que pronostica un continuo aumento del desorden. Esta afirmación parece oponerse aún más a la idea de una continua «estructuración» del Universo. A continuación podremos ver que está basada en una generalización errónea.

Pero antes queremos hacer una observación. La idea de «orden» sólo tiene sentido si añadimos «en relación a». Por ejemplo, la distribución de personas en dos piscinas puede guardar cierto orden en relación a la distinción entre nadadores y no nadadores, en relación al sexo o a la edad, al peso o al color del pelo.

Para explicar la segunda ley de la termodinámica suele describirse el siguiente experimento: si conectamos mediante un tubo un recipiente lleno de gas con otro vacío, llegará a establecerse, en más o menos tiempo, dependiendo del tama-

ño del orificio de comunicación, un estado de equilibrio en el cual el gas se habrá repartido entre las dos cámaras. Este estado es más probable si las moléculas se mueven desordenadamente. Y es el estado más probable, puesto que es el que siempre se produce. Por tanto, el sistema en su totalidad tiende del «orden» al «desorden».

Pero pongamos otro ejemplo: imaginemos una nube de hidrógeno en el espacio lejos de cualquier cuerpo celeste. ¿Qué ocurrirá? Por efecto de la fuerza de atracción de las masas, la nube se aglutinará hasta dar lugar a una estrella. ¿Puede decirse ahora que el «orden» se ha convertido en «desorden»? Es más bien al revés.



¿Cuál es el *quid* de la cuestión? Naturalmente, hemos introducido la fuerza de atracción de las masas; sin ella, la nube de gas se hubiera desintegrado en el espacio. El «estado resultante» habría sido entonces un mayor desorden. En cambio, con la gravedad de por medio, el estado final (si la nube es lo bastante grande y está suficientemente alejada de otros cuerpos celestes) será una masa de gas aglutinado. Así pues, no todos los acontecimientos tienden a desarrollarse hacia un mayor desorden.

Mientras que en el primer ejemplo la situación de cada molécula será fortuita (el gas quedará dividido entre las dos cámaras a consecuencia de los innumerables choques que se producen entre las moléculas en un desordenado movimiento térmico), en la nube de gas cósmico, los mismos procesos fortuitos tenderán, a consecuencia de la gravedad, a establecer un movimiento ordenado hacia el centro de la masa. El movimiento de las partículas individuales ya no es independiente; su posición ya no estará determinada por el azar.

La situación final será el desorden cuando la magnitud física a la que se hace referencia (en nuestros ejemplos se trata de la localización de las moléculas) depende exclusivamente de procesos fortuitos entre los que no existe ninguna dependencia ni relación. En nuestra nube de gas, la fuerza de la gravedad afecta al movimiento de las partículas y, por tanto, influye en su colocación.

La segunda ley de la termodinámica describe el sentido en que se desarrollan los procesos que dependen de un «desorden elemental», es decir, de diversas causas aleatorias e independientes; pero sólo esto[4]. Sin embargo, es un error muy extendido pensar que la segunda ley de la termodinámica es aplicable, o no, a un sistema determinado. Se trata de distinguir qué aspectos del sistema, es decir, qué magnitudes físicas, son las que se consideran, y de ver si la distribución está determinada exclusivamente por acontecimientos fortuitos.

Por tanto, no puede decirse que la segunda ley de la termodinámica es, o no, aplicable a una nube de gas cósmico o a una estructura cualquiera. Así pues, esta ley es aplicable en los dos sistemas descritos (y también en cualquier otro sistema) en cuanto a la distribución de la energía térmica (que se basa en procesos de «desorden elemental»). Fue precisamente de experimentos relativos al calor de donde se dedujo originalmente dicha ley. Sin embargo, en ninguno de estos dos sistemas puede aplicarse la segunda ley de la termodinámica a la distribución espacial de las moléculas, es decir, a lo que normalmente denominamos «orden» o «desorden». Y no lo es precisamente porque la distribución espacial de las partículas está también determinada .por factores no aleatorios.

Sólo podemos hablar de la aplicación de esta ley en *relación a la distribución de uno magnitud físico determinada.* La

[4] Con objeto de evitar que puedan producirse más malentendidos, queremos recordar que la segunda ley de la termodinámica ha sido deducida de forma empírica y que, por tanto, no disponemos de ninguna prueba real de su carácter de ley. De ahí que su ámbito de vigencia no pueda ser rigurosamente delimitado, sino sólo convenientemente intuido. En este sentido deben entenderse las precisiones que hemos expuesto.

termodinámica nos proporciona una descripción correcta cuando esa distribución depende exclusivamente de procesos aleatorios independientes entre sí. Por tanto, no tiene que producirse necesariamente el caos cuando intervengan factores no aleatorios, como, por ejemplo, cuando la gravedad o el magnetismo desempeñan un papel decisivo en la distribución de las partículas, o cuando los factores aleatorios decisivos presentan cierta interrelación, como ocurre en la autoduplicación de las estructuras biológicas.

Vemos, pues, que es un error generalizar y afirmar que todo sistema aislado tiende a un mayor desorden. Este tipo de afirmaciones rebasan irresponsablemente los límites de la aplicación de la segunda ley de la termodinámica. Esta ley no puede aplicarse en absoluto a la distribución de la materia en el Universo, ni a la capacidad de las estructuras de crear otras estructuras. Sólo en la esfera del desorden elemental, sólo allí donde reina exclusivamente el azar, donde no existe ninguna relación entre los sucesos fortuitos, donde no se desarrollan estructuras, podrá extenderse el caos. Pero afirmar esto es casi trivial.

La evolución de nuestro Universo se debe a que la existencia de determinadas interdependencias (estructuras) crea nuevas interdependencias (estructuras) entre elementos hasta entonces independientes. Según la segunda ley de la termodinámica, en este proceso se nivela cada vez más la distribución de toda la energía del Universo; pero esto no quiere decir que tenga que producirse necesariamente una distribución caótica de la materia. Decir que la física nos enseña que el caos es el destino final de todos los mundos es malinterpretar la física.

Las condiciones iniciales del Universo y las propiedades de la materia conducen al desarrollo espontáneo de estructuras, no a un aumento del «desorden».

> Los procesos macroscópicos se desarrollan de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica sólo cuando se cumple la hipótesis del desorden elemental, y sólo entonces.
>
> MAX PLANCK

25. EL JUEGO DE DADOS QUE NO ERA UN JUEGO DE AZAR

> «Lo que acontece en la naturaleza parece estar sometido a determinadas leyes en un grado mucho más elevado del que nosotros deducimos basándonos en la causalidad que llegamos a imaginar.»
>
> EINSTEIN

El azar constituye indiscutiblemente el trasfondo de la evolución, así como la selección constituye el filtro que escoge las casualidades positivas dejando pasar únicamente las que superan el examen de la adaptación. Así pues, el azar y la necesidad estructuran conjuntamente el desarrollo de nuestro mundo. Sin embargo, las opiniones de los científicos se dividen ante la cuestión de qué es más importante a la hora de determinar el curso de la evolución: ¿los acontecimientos aleatorios o la necesidad derivada de la dinámica interna del sistema? Se trata de dos concepciones diferentes y antagónicas. Veamos los argumentos que esgrimen ambas partes:

Defensa de la causa 1:

Tenemos suficientes motivos para suponer que todos los seres vivos del planeta, animales y plantas, se han desarrollado a partir de un mismo origen (universalidad del código genético, isomerismo de las moléculas biológicas). Somos conscientes de que el azar es un factor fundamental en el proceso evolutivo. Puesto que no somos capaces de ver una finalidad ni una necesidad concreta en las fortuitas ramificaciones de las especies, no podemos sino deducir que el surgimiento de la vida en nuestro planeta, y su evolución hasta llegar al hombre, es el resultado de una afortunada combinación de factores aleatorios: por tanto, es imposible que vuelva

a producirse en el Universo la coincidencia de tantos sucesos aleatorios de por sí improbables. Por eso consideramos que el hombre tiene que ser el único ser inteligente del cosmos. Nos negamos a ver en la naturaleza algo más que la ciega casualidad y rechazamos enérgicamente cualquier combinación del pensamiento científico con las ideas religiosas.

Defensa de la causa 2:

Hasta el momento es injustificable atribuir al hombre un puesto especial en la naturaleza. Ni nuestra sociedad ni nuestro planeta son el centro del Universo. La idea de que el hombre ocupa un puesto central y exclusivo es producto de especulaciones elitistas y reminiscencia de la actitud competitiva del pasado.

Hay aspectos de la evolución que han sido clasificados como procesos inevitables derivados de la dinámica interna de los sistemas y, aunque aún quedan algunos interrogantes, no hay motivo para tratar de enriquecer la ciencia con «milagros». Eso no sería proceder con rigor científico. Que todas las criaturas del planeta presenten determinadas características comunes sólo viene a demostrar que en cierto momento surgió un organismo superior a todos los demás organismos de su época del que se derivaron posteriormente todas las especies.

La evolución se dirige claramente hacia una finalidad, y muy probablemente es producto de una *continua* necesidad. La selección —ese colador que filtra todas las casualidades— impone una dirección. De todo esto deducimos que existen otros planetas en los que han podido formarse sistemas biológicos y. más adelante, intelectuales.

Estas son las dos alternativas.

Los defensores del azar afirman que los defensores de la necesidad no son más que «creyentes» incapaces de distinguir entre el «saber» y las esperanzas religiosas; que el sentido que atribuyen al Universo es una proyección de su sentido subjetivo, puesto que el Universo es ajeno a todo sentido, por no

decir carente de sentido. Que tal actitud se debe a la necesidad, también subjetiva, de tender un puente entre el hombre y la naturaleza, y que esta necesidad tiene las mismas raíces que cualquier otra esperanza religiosa.

Y no andan completamente descaminados. Pero los defensores del azar pasan por alto dos cuestiones: primero, que no fue la religión la que descubrió las leyes básicas de la naturaleza, sino la ciencia. Segundo, que son «creyentes» tanto los partidarios de una postura como los de la otra. Lo único que cambia es su credo».

Creer en una evolución sin finalidad, determinada exclusivamente por el azar, es en cierto modo tragicómico. En su afán por superar la «noción arcaica» y elitista de que el hombre es la meta y la coronación del plan de la creación, la reemplazan por una «nueva» actitud elitista: creer en la unicidad del hombre en el marco de un Universo frío y silencioso. Y eso vuelve a hacer de nosotros algo especial, la culminación de la evolución. La diferencia es que en el lugar del creador hemos colocado el azar. ¡No hemos adelantado mucho! Con esta concepción seguimos aceptando el «milagro»; lo único que hemos conseguido es perder el sentido de nuestra existencia en un círculo vicioso de ideas.

Ninguna de las dos teorías es, hoy por hoy, demostrable. Sin embargo, vamos a analizar las dos alternativas a la luz de nuestros conocimientos.

La física nos muestra la evolución en la fase material como una consecuencia de las condiciones iniciales del Universo y de las propiedades de las partículas elementales. La fuerza de la gravedad aglutina estas partículas, pero el impulso de rotación hace que las galaxias y los planetas sigan girando, e impide que las masas se estrellen unas contra otras. En todo el Universo se producen reacciones nucleares que dan lugar a las mismas estructuras en todos los sistemas solares; esto es una consecuencia necesaria de las propiedades de protones y neutrones; una necesidad derivada de las propiedades de la materia.

Las cargas eléctricas de los núcleos atómicos y de los electrones hacen que se produzcan los átomos; éstos establecen múltiples enlaces químicos. Las propiedades de los átomos se derivan de las propiedades de las partículas elementales.

Los meteoritos demuestran que también fuera de nuestro planeta se producen elementos moleculares básicos para la configuración espontánea de polímeros y su tendencia a formar agregados.

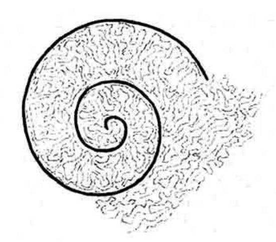
Nadie puede dudar de que las propiedades de los elementos básicos del Universo (dadas determinadas condiciones iniciales) provocaron un desarrollo espontáneo (y esto quiere decir también necesario) que condujo a la complejidad estructural de los agregados de polímeros. Hasta aquí, la evolución es claramente un proceso determinado por la propia materia, que se desarrolla en cualquier lugar en que se den las mismas condiciones iniciales.

El paso decisivo de la evolución, ante el que comienzan a dividirse las opiniones, es el surgimiento de la capacidad de autoduplicación de las estructuras. Se puede pensar que este proceso fuera debido a una única y extremadamente improbable casualidad; que el azar fuera el único responsable de este paso de enormes consecuencias. Sin embargo, también es posible que fueran muchos los agregados que iniciaran una autoduplicación rudimentaria, y que se consiguiera superar las dificultades para lograrlo en otros sitios: allí donde existieran unas condiciones adecuadas, es decir, unas condiciones parecidas a las que existieron en la Tierra. No podemos saberlo.

Lo que es asombroso, de todos modos, es que una determinada complejidad estructural, es decir, unas determinadas interrelaciones de los componentes básicos de los agregados, hicieran posible el «milagro» de la autoduplicación, y *precisamente éste.*

Y tenemos que llamarlo «milagro», puesto que es la facultad de autoduplicación inexacta lo que empuja a la evolución a traspasar el umbral de una segunda fase, en la que continuará *necesariamente* el curso de este desarrollo.

Podríamos imaginar toda clase de propiedades diferentes, como, por ejemplo, una nueva tendencia de determinadas estructuras a alterar sus relaciones internas para conseguir una mayor regularidad o un orden parecido al de una estructura cristalina, o una mayor capacidad para ampliar su estructura fortuita siguiendo una forma helicoidal. También a estos procesos deberíamos denominarlos «vida».



Pero no fue así. La nueva capacidad posee tales características que establece la competencia como fuerza motriz de todo el proceso evolutivo posterior. Las estructuras, con su autoduplicación inexacta, tienen que entrar en relación de competencia. Y la competencia conduce a la selección de aquellas estructuras capaces de autoduplicarse con mayor rapidez y exactitud. La selección permite sólo —o favorece únicamente— la supervivencia de las estructuras con mejores cualidades. Y está claro que las cualidades superiores requieren un mayor grado de complejidad.

Vemos, por tanto, que la necesidad de una ampliación de las dimensiones y las capacidades de las estructuras va *inexorablemente unida* a la esencia del fenómeno de la autoduplicación. Esta nueva capacidad se produjo a partir de las propiedades de las moléculas. No sabemos a ciencia cierta si el desarrollo estructural tiene que conducir *forzosamente* a la fotosíntesis y. paralelamente, a la formación de organismos animales; lo que sabemos es que el agotamiento del caldo primario crea una situación crítica que, a largo plazo, sólo puede ser superada —si es superada— de esta manera. Tampoco sabemos si los organismos unicelulares tienen que unirse *necesariamente* para formar organismos pluricelulares; pero sí que este paso fue dado *independientemente* tanto por

las plantas como por los animales. Y esto nos hace pensar otra vez en una necesidad.

El segundo paso decisivo es el surgimiento de las células nerviosas y la formación de sectores estructurales capaces de registrar la información. Una vez más, esta nueva capacidad estructural puede haber sido el resultado automático de las relaciones presa/depredador, aunque también puede haberse debido a una casualidad extraordinariamente afortunada.

Puesto que el mecanismo estructural capaz de registrar información nos es menos comprensible aún que el mecanismo de autoduplicación, nos sorprenderá igualmente que, dado cierto grado de complejidad estructural, pueda surgir la capacidad de registrar información, y que toda la evolución subsiguiente esté determinada precisamente por esta nueva y misteriosa capacidad lograda por estructuras altamente complejas.

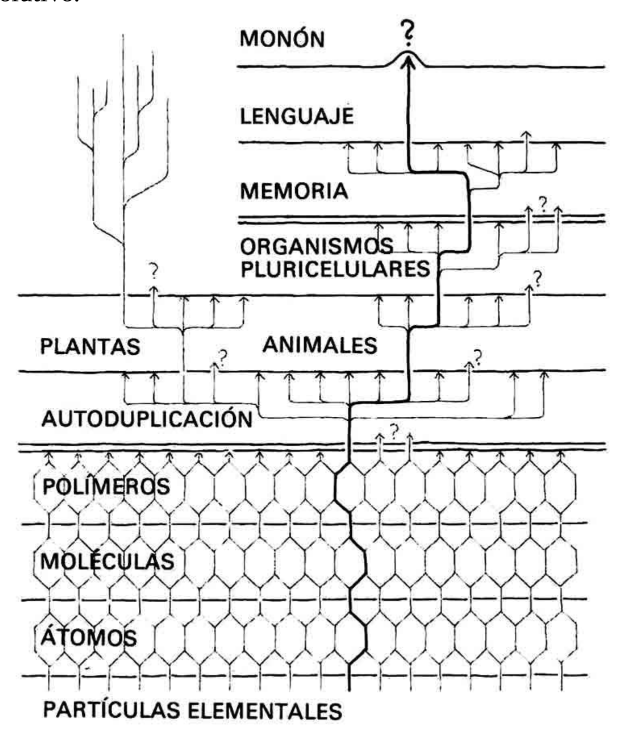
La evolución posterior y el surgimiento del lenguaje como medio de comunicación entre los organismos, ¿es también parte de un proceso evolutivo impulsado por la necesidad?

Sabemos que los insectos sociales, las bandadas de pájaros y las manadas de mamíferos constituyen independientemente integraciones de individuos en grupos: que la comunicación mediante símbolos se da también entre animales, por ejemplo, entre las abejas, aunque se trata de una comunicación rígida porque está determinada por el código genético y no por los sectores capaces de registrar información de su sistema nervioso.

Después de estas consideraciones nos parece que el proceso de integración de elementos básicos para constituir unidades cada vez más elevadas —proceso que se manifiesta en todas las esferas de la naturaleza y que tiende a ampliarse cada vez más— es un principio fundamental del desarrollo evolutivo.

Hemos podido observar que las propiedades de la materia y de las estructuras ya formadas conducen necesariamente a una ampliación de las estructuras en dimensión y capacidad. Sin embargo, sigue habiendo interrogantes, al menos, en los dos umbrales que dan paso a las nuevas fases de la evolución.

Aún no ha podido demostrarse científicamente que exista una necesidad imperiosa y constante a lo largo de todo el proceso evolutivo.



Pero para afirmar lo contrario —es decir, que no existe una presión, una necesidad que impulsa la evolución, sino que todo proceso se basa meramente en acontecimientos únicos y fortuitos— nos faltan argumentos. Para sostener tal afirmación habría que *demostrar*, y no *suponer*, que la probabilidad de superar el siguiente peldaño, o sea, de pasar de una fase evolutiva a otra, tiene que ser ínfima. Pero ¿qué significado tiene «probabilidad» en este contexto?

En determinado estadio evolutivo existen miles de especies, millones y millones de unidades orgánicas que van au-

mentando de generación en generación. La evolución dispone de tiempo, de mucho tiempo.

No importa que hoy no se consiga nada. Las mutaciones fortuitas siguen jugando, y continúan jugando y jugando...

En realidad, sólo hay dos cuestiones fundamentales:

1. ¿Hay un «6» en el dado de la naturaleza? Es decir, ¿es posible pasar a otra etapa evolutiva? Y, en caso de que la respuesta sea afirmativa:
2. ¿De cuánto tiempo dispone la evolución? ¿Cuántas veces puede seguir tirando el dado? Si el tiempo de que dispone es infinito, seguro que en *algún* momento, *alguna* de las unidades estructurales conseguirá «sacar un seis» y pasar a la siguiente etapa.

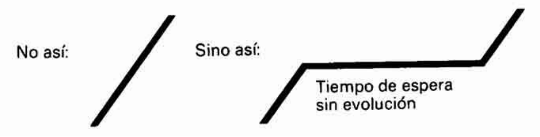
Nuestra propia existencia demuestra que todas las etapas anteriores eran *posibles*. *Nuestra* evolución ha conseguido subir todos los peldaños hasta llegar al umbral de la fase intelectual. Para subir todos esos peldaños fue necesario que saliera un «6».

Según esto, tenemos que cambiar el planteamiento de la pregunta. Ya no podemos preguntar si *podría ser* que en algún lugar del Universo..., sino si en algún lugar del Universo han surgido *a tiempo* seres inteligentes. Las preguntas son: «¿Cuántos planetas habrá en los que se den condiciones similares a las del nuestro?» Y: «¿Cuánto tiempo de vida tiene un monón?»

Al menos en nuestro planeta, no parece que haya sido demasiado difícil superar los diferentes peldaños. ¿Por qué suponemos esto? Podemos deducirlo de nuestro «diagrama evolutivo» (véase pág. 263): la línea recta correspondiente a la base biológica, que muestra un desarrollo exponencial de las estructuras, comienza poco después de la formación (del enfriamiento) de nuestro planeta, cuya edad podemos fijar con bastante exactitud. *Si el surgimiento de la vida en el caldo primario hubiera sido tan extremadamente improbable, ¡la vida podría haber aparecido varios miles de millones de años después!*

Por tanto, quien desee creer en el «milagro» de la vida — y, dada su extrema improbabilidad, sería un verdadero «milagro»— tendrá que creer también en otro «milagro»: que la vida surgiera en nuestro planeta *en cuanto fue posible.* Es evidente que con esto la hipótesis no gana credibilidad.

A partir del surgimiento de la vida, el proceso evolutivo (dejando a un lado algunas oscilaciones en casos particulares) se desarrolló también bastante aprisa. Si se hubiera dado el caso de que la evolución se hubiera atascado durante miles de millones de años antes de superar una dificultad, la curva correspondiente a la fase biológica en nuestro diagrama no hubiera sido



Nuestra reacción puede ser semejante a la de un espectador que ve una película que muestra a alguien jugando a los dados: en la primera tirada saca un «6»; en la segunda, un «6», y también en la tercera y en la cuarta... y así sucesivamente. En la tirada número cien, también saca un «6». Y en la número mil. Siempre sale un seis. El espectador se sonríe: no puede ser, aquí hay gato encerrado. O el director de la película ha usado un dado que tiene el «6» en todas sus caras, o ha cortado las secuencias de las demás tiradas; ha realizado una «selección».

Pero entonces vienen los científicos y nos dicen: ¿Por qué? ¿Por qué se sorprenden tanto? ¿Por qué iba a tener que manipular nada el director? ¿Por qué no puede haber sido así? Al fin y al cabo, no es *absolutamente imposible* que salga el seis en miles de tiradas consecutivas. «Cuando el diablo lo quiere, puede suceder incluso lo imposible.»

No disponemos de medios «científicos» para rebatir semejante argumento, así como tampoco podemos refutar la explicación que dan algunos antievolucionistas al afirmar que Dios puede haber colocado fósiles en diferentes capas terrestres para que tuviéramos la *impresión* de que ha habido una evo-

lución progresiva en lugar de una única y definitiva Creación. Hay afirmaciones ante las que la ciencia tiene que rendirse; es cuestión de sentido común. En realidad, es ridículo preocuparse de ellas.

Lo único que sabemos con seguridades que el dado que utiliza la naturaleza contiene al menos un seis. Los resultados de las diferentes tiradas dependen del azar. Pero si se sigue tirando el dado el suficiente número de veces, seguro que aparece otro seis. La disyuntiva que se había planteado, «azar o necesidad», carece *de sentido.*

La evolución del Universo está basada en las condiciones iniciales y en las propiedades de la materia en dichas condiciones. A partir de esta situación inicial se van encadenando una serie de acontecimientos fortuitos que siguen una dirección determinada. Las estructuras que van surgiendo ejercen una influencia sobre el resto de la materia, lo que conduce a una progresiva integración de elementos hasta entonces independientes en estructuras cada vez más eficientes y complejas. La flecha indicadora de este desarrollo parte del caos y se dirige hacia la formación de una superestructura intelectual intergaláctica, cada uno de nosotros es sólo una parte diminuta de esa estructura.

EPÍLOGO

MÁS ALLÁ DE LA CIENCIA

> «... ¿Nunca se os ha ocurrido pensar que el mundo podría ser una Unidad, una Unidad generadora de vida y felicidad a la que respetáramos conscientemente y sirviéramos con amor?»
> Hermann Hesse

En el dado del Universo hay un seis.
La evolución *es* posible.

La materia tiene propiedades
que conducen a la formación de galaxias y sistemas solares;
al surgimiento de la vida y del cerebro.

Es increíble que sea así y no de otro modo.
Sin la fuerza de la gravedad, habría un mayor caos;
sin el impulso de rotación, no habría ninguna forma;
sin las cargas eléctricas, no habría átomos;
sin el lenguaje, no existiría el hombre.

Lo que no es comprensible es el principio,
la causa primera de todos los acontecimientos.

ESA CAUSA ES ALFA.

Es el motivo de todo desarrollo.
Las palabras no pueden explicarlo.

Quien llega a sentir el milagro de su origen
se siente confiado,
se siente protegido en el desarrollo de las estructuras.

Se disuelve la tensión interna,
la tensión entre el saber y las esperanzas religiosas
que iban unidos, pero no coincidían.

La existencia humana cobra sentido por la dirección,
la dirección de la evolución.

Tiene sentido todo acto *que esté de acuerdo con* el desarrollo.
que permita el desarrollo de las estructuras
y establezca nuevos vínculos.

Tiene sentido todo esfuerzo que, basado en lo ya establecido,
intente probar cosas nuevas.

Tiene sentido todo esfuerzo por aumentar la información,
por difundir el saber,
por profundizar los sentimientos.

Tiene sentido toda lucha por la tolerancia activa.
por la confianza universal,
por la superación del miedo y la violencia.

El futuro de una humanidad infantil y desvalida
está en nuestras manos,
tenemos que ayudarla a aprender a ver.

ÉSTA ES LA MISIÓN.

Las partículas elementales se atraen,
los átomos establecen enlaces,
las células forman aglomerados.

Todas las fases de la evolución tienen siempre un único fin,
ser parte de algo mayor mediante la integración.

La tendencia a integrarse
es la fuerza motriz de todo desarrollo.

En la era del hombre se denomina «amor».

El hombre necesita más amor hacia la humanidad,
una mayor disposición a ponerse en el lugar del otro,
una mayor compasión hacia los necesitados,

más solidaridad con los débiles,
una mayor responsabilidad individual ante la totalidad.

ÉSTE ES EL ÚNICO CAMINO.

Al margen de la transformación
del «yo» biológico en un «nosotros» intelectual
nadie tiene futuro.

En algún momento, en algún lugar del Universo
seres sensibles e inteligentes
experimentarán algo semejante y pensarán de un modo semejante
cuando su existencia individual
adquiera una consciencia cósmica.
cuando se sientan parte del Universo
y parte de un desarrollo
que *surge del Caos* y *va hacia el Cosmos.*

Las estructuras de todos los mundos se integrarán
en una Unidad
que, en un continuo y acelerado cambio de su estructura,
buscará la perfección.

El saber cósmico se convertirá en omnisciencia.

Después, tras un período ilimitado de tiempo,
esta Unidad que abarca a todas las estructuras
a través de una alteración inconcebiblemente rápida de su forma
contendrá en sí misma la forma de *todas* las estructuras.

Entonces todo será armonioso
en la Unidad omniabarcante.

OMEGA ES LA META.

Recordemos:

Habíamos recomendado al lector que leyera dos veces este libro.

La segunda lectura ha de estar acompañada de una mayor reflexión para poder captar todos los detalles y comprender que todas las propiedades de la naturaleza contribuyen *conjuntamente* a hacer posible el milagro de la EVOLUCIÓN.

Esta obra debe su forma actual a la colaboración de muchos amigos que se preocuparon de leer, criticar y enriquecer con sus opiniones el manuscrito original. A todos quiero expresar mi agradecimiento, y especialmente a Manfred Neumann, por sus constantes sugerencias; a Renate Ziegler, por su inestimable ayuda a la hora de escribirlo; a Rainer Diesel, por la confección de dibujos y gráficos, y a M. B. por su comprensión y paciencia.

Los honorarios de autor han sido cedidos a la fundación CATENA, que es propietaria también de todos los derechos sobre este libro.

CATENA es una fundación para profundizar y divulgar los conocimientos sobre la evolución. Esta fundación está bajo la tutela fiduciaria del Stifterverbands für die Deutsche Wissenschaft, 4300 Essen 1.



En este libro se propone un nuevo concepto, científicamente fundamentado, de gran importancia para el pensamiento humano: el de la evolución del Universo. En dicha evolución pueden reconocerse tres fases: la material, la biológica y la espiritual. Esta última fase es especialmente importante para nosotros, y en ella se plantean las cuestiones decisivas: ¿Cómo puede –o cómo debe– continuar dicha evolución? ¿Se trata de un proceso errático, o lleva una dirección concreta? El autor analiza en profundidad todas estas cuestiones, contribuyendo así de modo decisivo a nuestra comprensión del mundo y de nosotros mismos.

Carsten Bresch es físico y doctor en biología. Ha trabajado en el Instituto Max Planck de Gottingen y en el Southwest Center for Advanced Studies de Dallas (Texas), y es catedrático de genética de la Universidad de Friburgo. Autor de numerosas publicaciones científicas y de divulgación, es especialmente conocido por un manual de genética utilizado en muchas universidades de todo el mundo.